



Endbericht

zum Verbundprojekt

„Optimierung der nachhaltigen Biomassebe- reitstellung von repräsentativen Dauergrün- landtypen für die thermische Verwertung“ (GNUT-Verbrennung)

Gefördert durch:



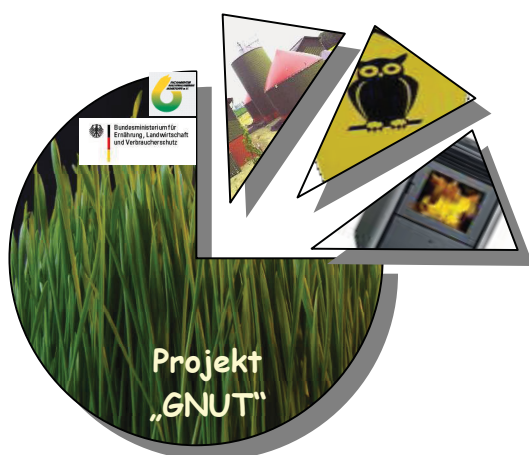
Bundesministerium für
Ernährung, Landwirtschaft
und Verbraucherschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

über die



FKZ 2200-5808 (08NR058)



In Zusammenarbeit mit:



Projektlaufzeit: 01.06.2008 – 30.04.2011

**Projektleitung
und Koordination:** Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (**TLL**)

Beteiligte: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (**TLL**)
Deutscher Grünlandverband (**DGV**)
Landwirtschaftskammer Niedersachsen (**LWK-NI**)
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
(**LFULG**)
Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft (**LfL**)
Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (**ATB**)
Büro für Ökologie und Landschaftsplanung (**SALIX**)

Berichtlegung: 31.08.2011

Projektleiter: PD Dr. Hans Hochberg (**TLL**)

Bearbeiter: Dr. Katja Gödeke (**TLL**)
Thomas Hering (**TLL**)
Florian Schmidt (**TLL**)
Yulia Lochmann (**ATB**)
Elisabet Hochberg (**DGV**)
Urs Jäger (**SALIX**)

Jena, im August 2011


(Dr. Armin Vetter)
stellvertretender Präsident


(PD Dr. Hans Hochberg)
Projektleiter

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	III
Abkürzungen.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VII
Abbildungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	11
2 Literatur	12
2.1 Biomasseanfall aus gezielter Landschafts- und Biotoppflege vom Dauergrünland	12
2.2 Qualitätsrichtwerte der Grünlandnutzung für Wiederkäuer	14
2.3 Qualitätsrichtwerte für Biomasse zur Verbrennung	15
2.4 Möglichkeiten der Biomasseverwertung aus verbrennungstechnischer Sicht.....	18
3 Material und Methoden.....	21
3.1 Dauergrünlandtypen und Standorte	21
3.2 Methode.....	24
3.2.1 Feldversuche und statistische Methoden.....	24
3.2.2 Laboranalysen	26
3.2.3 Verbrennungsversuche Quader-Großballen in einer Praxisanlage.....	26
3.2.4 Biomasseherstellungskosten.....	28
3.2.5 Modellregionen - Potenzialschätzung, Verwertungsszenarien.....	29
3.2.5.1 Beschreibung der Modellregionen	29
3.2.5.2 Ermittlung des Biomassepotenzials vom Dauergrünland	35
3.2.5.3 Ermittlung des Grünlandbedarfes	37
3.2.5.4 Szenarien zur Energiegewinnung aus Biomasse vom Grünland.....	37
4 Ergebnisse	43
4.1 Trockenmasseerträge	43
4.2 Futterqualität.....	44
4.3 Qualität der Biomasse - Verbrennungseignung.....	46
4.4 Pflanzenbestand	54
4.4.1 Zusammensetzung und Artenvielfalt	54
4.4.2 Struktur des Pflanzenbestandes.....	57
4.5 Nährstoffversorgung der Böden	59

4.6	Heuverbrennung in einer Praxisanlage	60
4.6.1	Inhaltsstoffe des Versuchsbrennstoffs.....	60
4.6.2	Emissionswerte.....	63
4.6.2.1	Kohlenmonoxid.....	63
4.6.2.2	Staub.....	65
4.6.2.3	Stickoxid.....	65
4.6.2.4	Sonstige Emissionen	66
4.7	Herstellungskosten der untersuchten Pflanzengesellschaften.....	67
4.8	Biomassepotenzialschätzung und Szenarien der energetischen Verwertung am Beispiel von Modellregionen	70
4.8.1	Biomassepotenzial vom Grünland zur Energiegewinnung.....	70
4.8.2	Dezentrale Verbrennung zur alleinigen thermischen Nutzung	73
4.8.3	Zentrale Verbrennung zur kombinierten Wärme- und Stromerzeugung.....	76
4.8.4	Dezentrale Biogasgewinnung als Alternativverwertung	77
5	Diskussion	79
6	Schlussfolgerungen	93
7	Zusammenfassung	94
8	Literaturverzeichnis.....	96
9	Anhang	101

Abkürzungen

a	Jahr
ADF _{org}	acid detergent fiber - Säure-Detergenz-Faser
ADL	acid detergent lignin - Säure-Detergenz-Lignin
AfA	Absetzung für Abnutzungen
AW	Aufwuchs
BB	Brandenburg
BfN	Bundesministerium für Naturschutz
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BMU	Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BÜK	Bodenübersichtskarte
BY	Bayern
C _t	Gesamtkohlenstoff
d	Tag
EA	Ertragsanteil
EFH	Einfamilienhäuser
el	elektrisch
ELOS	enzymlösliche organische Substanz
FFH	Fauna-Flora-Habitat
FM	Frischmasse
FWL	Feuerungswärmeleistung
Ges.-C	Gesamtkohlenstoff
GIS	Geoinformationssystem
GL	Grünland
GNUT	Grünlandnutzung
h	Stunde
ha	Hektar
HCl	Chlorwasserstoff
HCN	Blausäure (Cyanwasserstoffsäure)
HIT	Herkunftssicherungs- und Informationssystem für Tiere
HVL	Havelland
i. d. TM	in der Trockenmasse
ILK	Institut für Luft- und Kältetechnik
InVeKoS	Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem
I-TEQ	Internationale Toxizitätsäquivalente
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
kg	Kilogramm
LELF	Landesamt für Ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurneuordnung Brandenburg
LK	Landkreis
m	Meter
MAP	Marktanreizprogramm
m _B ³ /h	Betriebsvolumenstrom

ME	Umsetzbare Energie
MFH	Mehrfamilienhäuser
MIL	Ministeriums für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg
MULV	Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg
N ₂ O	Stickstoffdioxid (Lachgas)
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NEL	Netto-Energie-Laktation
NI	Niedersachsen
NN	Normal Null
NO _x	Stickoxide
oTM	organische Trockenmasse
PCDD/F	Polychlorierte Dibenzo- <i>p</i> -dioxine und Dibenzofurane (zusammengefasst: Dioxine)
RFA-Analyse	Röntgenfluoreszenzanalyse
SLF	Saalfeld-Rudolstadt
SN	Sachsen
SO _x	Schwefeldioxid
t	Tonne
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
th	thermisch
TH	Thüringen
TM	Trockenmasse
TMLNU	Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt (aktuell: Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Forsten, Umwelt und Naturschutz – TMLFUN)
Var.	Variante
ZFH	Zweifamilienhäuser

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Biomassepotenziale aus der Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse (FRITSCH ET AL., 2004)	12
Tabelle 2: Mindestanforderungen bzw. Orientierungswerte an den Futterwert von Grundfutter für die Milchviehfütterung und Qualitätsrindfleischerzeugung	14
Tabelle 3: Ansprüche an den Futterwert des Grünlandes in Abhängigkeit der Nutzung nach HERTWIG UND PICKERT (2005)	15
Tabelle 4: Qualitätsmerkmale von halmgutartiger Biomasse für die Verbrennung und die davon beeinflussten brenntechnischen Größen (Zusammenfassung aus HARTMANN ET AL., 2000; LAUNHARDT, 2002; VETTER, 2003)	16
Tabelle 5: Grenzwerte nach 1. BImSchV und TA-Luft	17
Tabelle 6: Richtwerte für die thermische Nutzung von Heu (nach HOFFMANN ET AL., 2010) ohne Angaben zur Art des Heus und des Stichprobenumfanges)	18
Tabelle 7: Übersicht verbrennungsrelevanter Inhaltsstoffe halmgutartiger Brennstoffe verschiedener Herkünfte und Bewirtschaftungsweisen einschließlich Stroh und Holz	19
Tabelle 8: pH-Wert und P, K, Mg-Gehalt im Boden zu Versuchsbeginn in 0 - 10 cm Tiefe	22
Tabelle 9: Nutzungssysteme der untersuchten Pflanzengesellschaften (Schnittregime und Düngung)	25
Tabelle 10: Annahmen für die Berechnung der Biomasseherstellungskosten	28
Tabelle 11: Annahmen für die Berechnung der Biomasseherstellungskosten in Anlehnung an die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (DEGNER, 2010)	29
Tabelle 12: Jährliche Erträge extensiver und intensiver Grünlandflächen im Havelland	36
Tabelle 13: Jährliche Nettoerträge verschiedener Vegetationstypen in Saalfeld-Rudolstadt (HOCHBERG, 2011)	36
Tabelle 14: Angenommene Grundfuttermengen in kg TM Tier ⁻¹ d ⁻¹	37
Tabelle 15: Charakteristika der Wohnhäuser und des Wärmebedarfs	38
Tabelle 16: Annahmen für die Wirtschaftlichkeitskalkulation der Biomasseverbrennung	39
Tabelle 17: Richtwerte für die Berechnung von Biogasanlagengrößen	40
Tabelle 18: Kenndaten für die Wirtschaftlichkeitskalkulation der Biogaserzeugung	41
Tabelle 19: Ausgewählte Vergütungssätze nach EEG 2009 [ct kWh ⁻¹], Inbetriebnahmejahr 2011	42
Tabelle 20: Futterwert der Aufwüchse nach Dauergrünlandtyp, Variante und Aufwuchs (n = 3 pro Variante und Aufwuchs)	45
Tabelle 21: Heizwert, Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Sauerstoffgehalte der Aufwüchse der Dauergrünlandtypen [% i. d. TM] (n = 3 pro Variante und Aufwuchs)	47

Tabelle 22: Rohasche-, Kalium-, Magnesium- und Kalziumgehalt sowie die Ascheerweichungstemperatur der Aufwüchse der verschiedenen Dauergrünlandtypen (n =3 pro Variante und Aufwuchs).....	48
Tabelle 23: Rohfaser-, Lignin- und Rohaschegehalte (550°C, 3 h) sowie Heizwert der Aufwüchse der Dauergrünlandtypen (n = 3 pro Variante und Aufwuchs, graue Felder: Nutzungsvarianten bei denen das Ertragspotenzial ausgeschöpft bzw. das Ertragsoptimum erreicht wurde (siehe Kapitel 4.1)).....	50
Tabelle 24: Gehalte der korrosions- und emissionsrelevanten Elemente in den Aufwüchsen der verschiedenen Dauergrünlandtypen (n = 3 pro Variante und Aufwuchs, graue Felder: Nutzungsvarianten bei denen das Ertragspotenzial ausgeschöpft bzw. das Ertragsoptimum erreicht wurde (siehe Kapitel 4.1))	51
Tabelle 25: Gehalte von Arsen, Cadmium, Blei, Chrom, Thallium, Quecksilber und Zink im Mittel der drei Versuchsjahre in den Aufwüchsen der untersuchten Pflanzengesellschaften (wobei blaue Felder niedrigste Gehalte und orange Felder höchste Gehalte aufweisen).....	53
Tabelle 26: Bewertung der Pflanzenbestände - Grünlandwert und Artenzahl	55
Tabelle 27: Bewertung der Pflanzenbestände - Strukturindex und Kräuteranteil.....	58
Tabelle 28: Bodenuntersuchung nach Versuchsende (0 - 10 cm Tiefe) im Vergleich zum Versuchsbeginn (grau hinterlegte Felder).....	59
Tabelle 29: Mittel-, Maximum- und Minimumwerte der aerosolbildenden Elemente sowie deren Summe im untersuchten Heu des Praxisversuchs (n = 8)	63
Tabelle 30: Durchschnittserträge der Versuchsjahre 2008 bis 2010 und die durchschnittlichen Trockensubstanzgehalte bei einer Gutfeuchte über 3 bei der Ernte.....	70
Tabelle 31: Flächen- und Biomassepotenziale extensiv bewirtschafteter (ext. bew.) und produktiver (prod.) Grünlandflächen im Havelland, unterteilt nach Ertragskategorien.....	71
Tabelle 32: Flächen- und Grünlandpotenziale in Saalfeld-Rudolstadt, unterteilt nach Ertragskategorien und verschiedenen Erhebungs-/Berechnungsmethoden	73
Tabelle 33: Energetisch nutzbares Biomassepotenzial vom Dauergrünland, Leistung der Biomassekessel und Anzahl beheizter Häuser auf Gemeindeebene im Havelland	74
Tabelle 34: Wirtschaftlichkeitsvergleich ausgewählter dezentraler Heizwerke im Havelland	75
Tabelle 35: Wirtschaftlichkeit der zentralen Biomasse-Heizkraftwerke im Havelland	76
Tabelle 36: Mögliche Standorte, Leistung und eingesetzte Substrate der Biogasanlagen	77
Tabelle 37: Wirtschaftlichkeit ausgewählter Biogasanlagen im Havelland.....	78
Tabelle 38: Summe der Elemente Stickstoff, Chlor, Kalium und Schwefel sowie der Anteil der Summe von Chlor, Kalium und Schwefel an der Summe der Aerosolbildner	81

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Jahresniederschläge in den Versuchsjahren 2008 bis 2010 und die langjährigen Mittel der fünf Versuchsstandorte (in mm)	23
Abbildung 2: Jahresdurchschnittstemperaturen der Versuchsjahre 2008 bis 2010 und die langjährigen Mittel der fünf Versuchsstandorte (in °C)	24
Abbildung 3: Landschaftsschutz-, Naturschutz- und Benachteiligte Gebiete im Havelland	30
Abbildung 4: Flächennutzung im Landkreis Havelland.....	31
Abbildung 5: Biogasanlagen im Landkreis Havelland (Stand Ende 2010).....	32
Abbildung 6: Landschaftsschutz-, Naturschutz- und Benachteiligte Gebiete in Saalfeld-Rudolstadt	33
Abbildung 7: Flächennutzung im Landkreis Saalfeld-Rudolstadt	34
Abbildung 8: Bioenergieanlagen im Landkreis Saalfeld-Rudolstadt (Stand 2011).....	35
Abbildung 9: Trockenmasseerträge [t ha^{-1}] im Mittel der drei Versuchsjahre (2008-2010) sowie der verschiedenen Pflanzengesellschaften und Nutzungsvarianten, wobei * Beerntung alle zwei Jahre ** gedüngte Nutzungsvarianten, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bei $p \leq 0,05$	43
Abbildung 10: Gehalte von Rohasche, Rohfaser, Lignin in Form von ADL, Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff [% i. d. TM] sowie der Heizwert [MJ kg^{-1} TM] des untersuchten Heus im Praxisversuch ($n = 8$).....	60
Abbildung 11: Gehalte von Kalium, Kalzium und Magnesium [% i. d. TM] sowie die Ascheerweichungstemperatur [°C] des untersuchten Heus im Praxisversuch ($n = 8$).....	61
Abbildung 12: Gehalte von Stickstoff, Schwefel und Chlor [% i. d. TM] im untersuchten Heu des Praxisversuchs ($n=8$).....	62
Abbildung 13: Gehalte von Arsen, Cadmium, Blei, Chrom, Thallium, Quecksilber, Zink [mg kg^{-1} TM] im untersuchten Heu des Praxisversuchs ($n = 8$)	62
Abbildung 14: Verlauf der CO-Emissionen [mg/Nm^3] an den drei Versuchstagen ($\frac{1}{4}$ h-Werte bezogen auf 13 Vol.-% O_2 im trockenen Abgas unter Normbedingungen).....	64
Abbildung 15: Emissionen beim Einsatz von Landschaftspflegeheu ($\frac{1}{4}$ h-Werte, $n = 40$; bezogen auf 13 Vol.-% O_2 im trockenen Abgas unter Normbedingungen)	64
Abbildung 16: Gesamtstaubemissionen im Rohgas an 3 Versuchstagen (jeweils $n = 3$; bezogen auf 13 % Vol.- O_2 im trockenen Abgas unter Normbedingungen)	65
Abbildung 17: Verlauf der NO_x -Emissionen [mg/Nm^3] an den drei Versuchstagen ($\frac{1}{4}$ h-Werte bezogen auf 13 Vol.-% O_2 im trockenen Abgas unter Normbedingungen).....	66

Abbildung 18: Verlauf der SO ₂ - und HCl-Emissionen [mg/Nm ³] an den drei Versuchstagen (¼ h-Werte bezogen auf 13 Vol.-% O ₂ im trockenen Abgas unter Normbedingungen)	67
Abbildung 19: Herstellungskosten [€ ha ⁻¹] der einzelnen Aufwüchse und deren Trockenmasseertrag [t ha ⁻¹], wobei * Beerntung alle zwei Jahre ** gedüngte Varianten.....	68
Abbildung 20: Herstellungskosten pro Tonne Trockenmasse [€ t ⁻¹] der einzelnen Aufwüchse sowie die durchschnittlichen Bereitstellungskosten für die einzelne Variante und Trockenmasseertrag [t ha ⁻¹], wobei * Beerntung alle zwei Jahre ** gedüngte Varianten	69
Abbildung 21: Räumliche Verteilung des Biomassepotenzials vom Dauergrünland für die Verbrennung in der Modellregion Havelland	72
Abbildung 22: Gehalte der Elemente Stickstoff, Kalium und Chlor [% i. d. TM] in den Aufwüchsen der Waldstorcheschnabel-Goldhaferwiese bei NPK-Düngung (60-20-150), PK-Düngung (20-110) und ohne Düngung im Vergleich zu den Gehalten in Stroh (Balken) nach (RÖSCH ET AL., 2007) sowie die Trockenmasseerträge der Aufwüchse (in t ha ⁻¹).....	83
Abbildung 23: Gehalte der Elemente Stickstoff, Kalium, Chlor, Magnesium und Schwefel [% i. d. TM] in den Aufwüchsen des Rohglanzgrasröhrchits bei K-Düngung (140 kg K ha ⁻¹), einem Schnitt ohne Düngung und zwei Schnitten ohne Düngung, im Vergleich zu Stroh (Querbalken) nach (RÖSCH ET AL., 2007) sowie die Trockenmasseerträge der Aufwüchse (in t ha ⁻¹)	84
Abbildung 24: Die zweckmäßigsten Nutzungsvarianten im Vergleich zu Stroh (rote Linie, Annahme: TM-Ertrag: 3,8 t TM ha ⁻¹ , Biomasseherstellungskosten: 60 € t ⁻¹ (BREITSCHUH ET AL., 2006), Gehaltsumme der Elemente Stickstoff, Chlor, Kalium, Schwefel: 2,84 % i. d. TM (HERING ET AL., 2008))	86

1 Einleitung

Dauergrünland hat vielfältige Funktionen, die neben der Futterproduktion, vor allem die Erhaltung der Artenvielfalt, Biodiversität und Bodenfruchtbarkeit, den Wasserschutz und die Produktion von Energie und Sauerstoff umfassen (ELSÄßER, 2006). Hinzu kommt, dass Dauergrünland ganze Landschaftsbilder prägt (ELSÄßER, 2006) und dadurch auch zur Wertschöpfung in der Landwirtschaft beitragen und die Attraktivität für den Tourismus fördern kann (RÖSCH, 2007).

Zum Teil ist die Erfüllung dieser Funktionen von der Bewirtschaftungsintensität abhängig und manche Funktionen schließen sich auch gegenseitig aus. Futter von extensiv bewirtschafteten Dauergrünlandflächen mit später Nutzung eignet sich z.B. nur bedingt für die Milchviehfütterung. Allerdings ist eine stetige Abnahme der Rinderbestände (FRITSCH ET AL., 2004) und die Abwanderung der Milcherzeugung in Maisanbaugebiete (ELSÄßER, 2006) zu beobachten. Dies hat die Folge, dass Dauergrünland vor allem in den Mittelgebirgen im unterschiedlichen Ausmaß Brach fällt (ELSÄßER, 2006). Der Erhalt von nicht mehr für die Futterbereitstellung benötigtem, aus naturschutzfachlicher Sicht wertvollem Dauergrünland und dessen naturschutzfachlichen Aufgaben, erfordert allerdings eine angemessene Nutzung mit einer geringen Nutzungsfrequenz und der Beibehaltung armer bis mittlerer Nährstoffverhältnisse (MAURER UND WAGNER, 2003). Aus fachlicher Sicht ist dafür die Abfuhr des Aufwuchses die beste Pflegevariante (MAURER UND WAGNER, 2003; OECHSNER, 2005; TONN ET AL., 2008B). Mulchen, das aus Kostengründen bei einer fehlenden landwirtschaftlichen Nutzung die kostengünstigste Variante wäre, hat den Nachteil, dass durch die verbleibende Biomasse zusätzlich Nährstoffe eingetragen werden und eine aus naturschutzfachlicher Sicht angestrebte Aushagerung bestimmter Standorte nicht erreicht werden kann (WERNER, 2001).

Zu der Verwertung von Aufwüchsen der gezielten Landschafts- und Biotoppflege sowie die Verwertung nicht mehr benötigter Dauergrünlandaufwüchse existieren zahlreiche Forschungsarbeiten (HECK ET AL., 2004; LWK WESER EMS, 2005; MAURER UND WAGNER, 2003; NITSCH ET AL., 2010; RODE ET AL., 2005; RÖSCH ET AL., 2007; WICHMANN UND WICHTMANN, 2009; WIEGMANN ET AL., 2007), die sich zum größten Teil isoliert mit regional anfallender Biomasse befassen (MAURER UND WAGNER, 2003; RÖSCH ET AL., 2007; WICHMANN UND WICHTMANN, 2009; WIEGMANN ET AL., 2007).

Die diskutierten Verwertungsmöglichkeiten umfassen dabei hauptsächlich die Verbrennung (ELSÄßER, 2003; KIESEWALTER ET AL., 2007; OECHSNER, 2005; PROCHNOW ET AL., 2009A; RODE ET AL., 2005; TONN ET AL., 2008B; WICHMANN UND WICHTMANN, 2009; WIEGMANN ET AL., 2007), die Kompostierung (ELSÄßER, 2003; KIESEWALTER ET AL., 2007), die Biogasproduktion (ELSÄßER, 2003; KIESEWALTER ET AL., 2007; PROCHNOW ET AL., 2009B; RODE ET AL., 2005; RÖSCH ET AL., 2006; WIEGMANN ET AL., 2007) sowie andere spezielle und individuelle Vermarktungsstrategien (MAURER UND WAGNER, 2003; MUCHOW ET AL., 1997).

Durch die Betrachtung spezieller Regionen bzw. nur einzelner Bundesländer sowie Unterschiede in den Feld- und Laborversuchsmethoden, lassen sich diese Arbeiten trotz umfangreicher Untersuchungen nur bedingt oder nicht miteinander vergleichen bzw. auf andere Standorte übertragen.

Die systematische Bearbeitung dieser Thematik unter Einbeziehung von Dauergrünlandtypen, welche die typischen Dauergrünlandregionen Deutschlands repräsentieren und unter

Verwendung einheitlicher Methoden erfolgte bisher nicht. Weiter fehlen fundierte Hochrechnungen zum Anteil der energetisch verwertbaren Dauergrünlandaufwüchse von repräsentativen Grünlandstandorten bei unterschiedlicher Bewirtschaftungsintensität und umfassende Bewertungen zur Ökonomie sowie zu Umweltwirkungen der Bereitstellungs- und Verwertungsketten.

Mit dem Vorhaben „GNUT-Verbrennung“ sollen die dringend notwendigen Kenntnisse für die Erschließung des energetischen Potenzials der naturschutzfachlich besonders wertvollen Pflanzenbestandstypen des Dauergrünlandes mit dem Fokus auf die thermische Verwertung bereitgestellt werden. Ferner sollen erarbeitete Strategien gezeigt werden, wie und in welchen Mengen der Aufwuchs von extensiven Dauergrünlandflächen mit oder ohne Bewirtschaftungsauflagen in geeigneter Form thermisch genutzt werden kann. Dazu werden die Bewirtschaftungs- und Verwertungsstrategien ökologisch und ökonomisch anhand entsprechender Kriterien bewertet.

2 Literatur

2.1 Biomasseanfall aus gezielter Landschafts- und Biotoppflege vom Dauergrünland

Zum Anfall von Biomasse aus der Landschafts- und Biotoppflege existiert eine Vielzahl von Arbeiten. Die meisten dieser Arbeiten beziehen sich auf einzelne Regionen bzw. Biotope. Nur wenige Arbeiten geben Potenziale zum Biomasseanfall aus Landschafts- und Biotoppflege für Deutschland insgesamt an. Die Arbeiten, die Potenziale für Deutschland angeben, unterscheiden sich je nach Annahmen teils erheblich im ermittelten Bioenergiepotenzial, allerdings weniger im Biomassepotenzial (siehe dazu OSTERMEYER UND PIRSCHER, 2011). FRITSCHKE ET AL. (2004) gehen in ihrer Arbeit über die Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse aus dem Jahr 2004, von drei unterschiedlichen Szenarien aus und geben Biomassepotenziale für die Jahre 2010, 2020 und 2030 an. Die Biomassepotenziale von Grüngut aus der Landschaftspflege bzw. aus extensiver Bewirtschaftung sind in Tabelle 1 aufgelistet. Bei dem Szenario „Biomasse“ wurde von einer extensiven Bewirtschaftung mit Einsatz von mineralischen Düngern ausgegangen, um ein geeignetes Substrat für die Biogasproduktion bereitzustellen.

Tabelle 1: Biomassepotenziale aus der Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse (FRITSCHKE ET AL., 2004)

Szenario	Referenz*			Umwelt*			Biomasse**		
	2010	2020	2030	2010	2020	2030	2010	2020	2030
Fläche in 1000 ha	325	453	862	121	235	542	27	186	497
Grünschnittmenge [Mio. t TM]	0,95	1,36	2,59	0,36	0,71	1,63	0,12	0,84	2,24

* Annahme Ertrag für Landschaftspflege $3 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$

** Annahme Ertrag für extensive Bewirtschaftung $4,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$

Eine weitere Studie zum Biomassepotenzial von Deutschland zur energetischen Nutzung wurde von KALTSCHMITT ET AL. (2008) im Jahr 2008 erarbeitet. In dieser Arbeit wird von einer derzeitig energetisch nutzbaren Biomasse in Form von Gras aus Grünland in Höhe von 2,6 bis 4,0 Mio. t FM a⁻¹ und in Form von Landschaftspflegematerial in Höhe von 0,9 bis 1,8 Mio. t FM a⁻¹ ausgegangen. Dabei werden jedoch keine Erträge bzw. verfügbare Flächen genannt.

WIEGMANN ET AL. (2007), die sich mit möglichen Synergien zwischen Bioenergie und Naturschutz durch die energetische Nutzung von Landschaftspflegeresten beschäftigten, betrachten als Grünlandstandorte speziell die Landschaften Freisinger Moos und Diepholzer Moorniederung. Im Freisinger Moos würden für die Verwertung 1 060 ha Grünland bereitstehen, mit einem Biomasseanfall von 18 703 t a⁻¹. Dabei reichen die Erträge von 26 t ha⁻¹ a⁻¹ bei gut mechanisierbarem, mit Gülle gedüngtem Grünland, über 8 t ha⁻¹ a⁻¹ für gut mechanisierbares, ungedüngtes Grünland bis hin zu 4 bis 4,5 t ha⁻¹ a⁻¹ für Wiesen im Kerngebiet des Freisinger Moos und kleine Wiesen, die nur mit mittlerem Gerät bzw. zum Teil nur mit der Hand beerntet werden können. Die Diepholzer Moorniederung umfasst 24 000 ha Hochmoore, 15 000 ha Feuchtgebiete und ca. 30 000 ha sonstige naturschutzwürdige Flächen, wobei speziell die abgetorften, degradierten Hochmoore sowie die Nass- und Feuchtwiesen auf die Abfuhr der Biomasse angewiesen sind, um ihre Naturschutzfunktionen zu erhalten. Die anfallende Biomasse sollte hier in einer Abfrage ermittelt werden, dies führte aber nicht zu exakt ableitbaren Potenzialen der energetisch nutzbaren Biomasse.

MAURER UND WAGNER (2003) beschäftigten sich in ihrer Studie zur Grasschnittverwertung mit der angemessenen Nutzungsweise der zunehmend aus der Bewirtschaftung fallenden Streuobstwiesen im Kreis Reutlingen. Die möglichen Verwertungsrichtungen und Maßnahmen reichten von der Förderung der landwirtschaftlichen Nutzung über die energetische Verwertung in Form von Biogas, Verbrennung und Grasraffinerie bis zu weiteren Maßnahmen wie Flächenkompostierung, Vor-Ort-Kompostierung, kontrolliertes Brennen und Mulchen.

In dem Forschungs- und Entwicklungsprojekt „Energiebiomasse aus Niedermooren – ENIM“ (WICHMANN UND WICHTMANN, 2009) wurden die Möglichkeiten der energetischen Verwertung von Niedermoorbiomasse in Form von Schilf und Rohrglanzgras untersucht. Es wurden mittlere Trockenmasseerträge von 12,46 t ha⁻¹ (Schilf) und 5,76 t ha⁻¹ (Rohrglanzgras) ermittelt.

In Rheinland-Pfalz fallen laut der „Studie zur Weiterentwicklung der energetischen Verwertung von Biomasse in Rheinland-Pfalz“ (HECK ET AL., 2004) 103 152 t grasartige Biomasse aus der Biotoppflege an. Dieses Biomassepotenzial wurde über die Größe der Naturschutzflächen in Rheinland-Pfalz berechnet. Die genaue Ermittlung des Biomasseanfalls aus dem Bereich Landschaftspflegegrünschnitt gestaltet sich durch die Aufteilung in Biotoppflege, Straßen-, Ufer-, Gewässer- und Schienenbegleitgrün schwierig. Dadurch ist das Biomassepotenzial, das im Rahmen von konkreten Projekten verfügbar ist, unbekannt. Aus Kostengründen und zur Nährstoffrückführung werden die bisher anfallenden Grünschnittmengen auf den Flächen belassen.

In der Arbeit „Energie aus dem Grünland – eine nachhaltige Entwicklung“ gehen RÖSCH et al. (2007) von einem Grünlandüberschuss in Baden-Württemberg in Höhe von 166 865 ha im Jahr 2015 aus, was 26 % der gesamten Grünlandfläche entspricht. Dabei fallen besonders Überschüsse von Wiesen mit Hangneigung von 25 % bis über 35 % (31 040 ha), von Wiesen mit hoher Artenvielfalt (24 702 ha), von FFH-Mähweiden (2 857 ha), Streuobstwiesen

(54 882 ha), Nasswiesen (7 190 ha) und Magerwiesen (2 692 ha) an. Von diesem Überschuss sind für die thermische Verwertung 18 239 ha Wiesen mit einer Hangneigung von 25 % bis 35 %, 7 410 ha artenreiches Grünland (hohe Artenvielfalt), 2 857 ha FFH-Mähwiesen, 33 667 ha Streuobstwiesen, 5 033 ha Nasswiesen und 2 692 ha Magerrasen geeignet. Somit wäre eine Verwertung von Grünlandbiomasse als Festbrennstoff von rund 67 200 ha Grünland möglich. Als Nettoerträge wurden bei zweischnittigen Wiesen Trockenmasseerträge von $5,0 \text{ t ha}^{-1}$, bei einmal genutzten zweischnittigen Wiesen Trockenmasseerträge von $3,9 \text{ t ha}^{-1}$ und bei Wiesen auf weniger wüchsigen Standorten, wie z.B. Magerwiesen, Trockenmasseerträge von $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ angenommen. Zusätzlich wurde von einer Düngung der zweischnittigen Wiesen nach Entzug ausgegangen, wohingegen eine Düngung der einschnittigen Wiesen unterblieb.

2.2 Qualitätsrichtwerte der Grünlandnutzung für Wiederkäuer

Nach HEILMANN UND HARMS (2009) sind für hohe Tierleistungen Energiekonzentrationen von 7,0 bis $7,2 \text{ MJ NEL kg}^{-1} \text{ TM}$ nötig und damit eine Energiekonzentration von über $6,3 \text{ MJ NEL kg}^{-1} \text{ TM}$ im Grünlandfutter. Eine Übersicht über die Mindestanforderungen bzw. Orientierungswerte an bzw. für den Futterwert von Grünlandaufwüchsen, Anwelk- bzw. Grassilage und Heu für die produktive Milcherzeugung bzw. für die Erzeugung von Qualitätsrindfleisch sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Mindestanforderungen bzw. Orientierungswerte an den Futterwert von Grundfutter für die Milchviehfütterung und Qualitätsrindfleischerzeugung

Parameter	Grünfutter			Anwelk- bzw. Grassilage		Heu
	(MARTIN, 2008)	(HEILMANN UND HARMS, 2009)	(ELSÄßER, 2004)	(MARTIN, 2008)	(SPIEKERS, 2004)	(MARTIN, 2008)
Trockenmasse [% FM]	< 22			35 - 40	30 - 40	86
Rohprotein [% TM]	> 16			> 14	< 17	> 12
Rohfaser [% TM]	< 21			< 25	22 - 25	< 30
Energie ME [MJ kg ⁻¹ TM]	> 10,7			> 10,5	≥10,6 (≥ 10,0)*	> 9,0
Energie NEL [MJ kg ⁻¹ TM]		> 6,3	5,0		≥6,4 (≥ 6,0)*	

* die Werte in Klammern beziehen sich auf die Folgeaufwüchse

In Tabelle 3 sind die Ansprüche an den Futterwert des Grünlandes in Abhängigkeit der Nutzung dargestellt.

Tabelle 3: Ansprüche an den Futterwert des Grünlandes in Abhängigkeit der Nutzung nach HERTWIG UND PICKERT (2005)

Kategorie	Verdaulichkeit der organi- sche Masse [%]	Rohfasergehalt [% TM]	Energiekonzentration	
			NEL [MJ kg ⁻¹ TM]	ME [MJ kg ⁻¹ TM]
Weide für Milchvieh	> 78	< 21	6,7 bis 7,0	11,0 bis 11,5
Silage für höchste Leistungen	75 bis 80	22 bis 24	6,2 bis 6,7	10,4 bis 11,0
Silage für Milchkühe, Jungrinder bis 2 Jahre, Kälberheu	70 bis 75	24 bis 28	5,8 bis 6,4	9,8 bis 10,6
Heu als Beifutter für Mutterkühe, Jungrinder, Altmelker, Schafe	60 bis 65	28 bis 30	5,0 bis 5,5	8,6 bis 9,4
selektives Weiden durch Pferde, Schafe, Mutterkühe ohne Kälber	< 60	> 30 überständig	< 5,0	< 8,6

2.3 Qualitätsrichtwerte für Biomasse zur Verbrennung

Zahlreiche Arbeiten zu den Themen Eignung, Eigenschaften und Beeinflussung der Brennstoffqualität halmgutartiger Biomasse (HARTMANN ET AL., 2000; HENRICI ET AL., 2007; HERING ET AL., 2005; LAUNHARDT, 2002; PEISKER ET AL., 2007; PEISKER, 2007; TONN ET AL., 2007; TONN ET AL., 2008A; TONN ET AL., 2008B; TONN, 2010; VETTER, 2003) sowie Verwertungsmöglichkeiten (Oechsner, 2005) und Verbrennungstechnik (HERING ET AL., 2005; OBERNBERGER, 1997; PEISKER ET AL., 2007; PEISKER, 2007) zeigen z. T. enge Zusammenhänge zwischen Brennstoffinhaltsstoffen und den dazugehörigen Emissionsparametern. Definierte Grenzwerte für einzelne Inhaltsstoffe der zu verbrennenden halmgutartigen Biomasse gibt es jedoch nur im Rahmen bestimmter Qualitätsstandards (z.B. DINplus, ENplus). Die aus der Sicht der Verbrennung relevanten Qualitätsmerkmale und die durch diese beeinflussten brenntechnischen Kenngrößen sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Qualitätsmerkmale von halmgutartiger Biomasse für die Verbrennung und die davon beeinflussten brenntechnischen Größen (Zusammenfassung aus HARTMANN ET AL., 2000; LAUNHARDT, 2002; VETTER, 2003)

Qualitätsmerkmal	brenntechnische Kenngrößen
Wassergehalt	Heizwert, Lagerfähigkeit, Verluste, Selbstentzündung, Brennstoffgewicht, Verbrennungstemperatur
Heizwert	Brennstoffausnutzung, Anlagenauslegung, energetischer Brennstoffwert
Gehalt an flüchtigen Bestandteilen	Brennverhalten, Anlagenauslegung
Cl	Emission von Organochlorverbindungen (z.B. PCDD/F) und HCl, Hochtemperaturkorrosion
N	NO _x , HCN- N ₂ O-Emission
S	SO _x -Emission, Hochtemperaturkorrosion, Verschmutzung durch Alkalisulfate
K	Hochtemperaturkorrosion, Ascheerweichungsverhalten, Verschmutzung, Verschlackung durch Bildung von Alkalisilikaten
Mg, Ca	Ascheerweichungsverhalten, Ascheeinbindung von Schadstoffen, Ascheverwertung
P	Einbindung in Asche
Na	Erniedrigt Ascheschmelzpunkt, Korrosion, Verschmutzung, Verschlackung durch Bildung von Alkalisilikaten
Al	Erhöht Ascheschmelzpunkt, Verschmutzung, Verschlackung
Fe	Erhöht Ascheschmelzpunkt, Verschmutzung, Verschlackung
Si	Erhöht Ascheschmelzpunkt, Verschmutzung, Verschlackung, Hauptaschebildungselement
Schwermetalle	Ascheverwertung, Schwermetallemission, zum Teil katalytische Wirkung bei PCDD/F-Bildung (Cu ²⁺)
Aschegehalt	Partikelemission (Staub), Rückstandsbildung und Verwertung, Auslegung Ascheaustragssysteme
Ascheerweichungstemperatur	Niveau des Schadstoffausstoßes, Schlackebildung und -ablagerungen (Anlagenauslegung), Betriebssicherheit und -kontinuität, Wartungsbedarf
Pilzsporen	Gesundheitsrisiken
Größe und Form	Zuordnung zu Beschickungsvarianten und Feuerungsanlagentypen, Aufbereitungsbedarf
Korngrößenverteilung /Feinanteil	Rieselfähigkeit, Brückenbildungsneigung, Belüftungs-/ Trocknungseigenschaften, Staubbildung und -emission Störungen in Förderelementen
Schütt-/Stapeldichte (Lagerdichte)	Transport- und Lagerungsaufwendungen, Brenneigenschaften, Logistikplanung, Leistung der Förderelemente, Brennstoffbunkergröße etc.
Rohdichte (Einzeldichte)	Schüttdichte, pneumatische Fördereigenschaften, Brenneigenschaften (Zündtemperatur, Brenngeschwindigkeit etc.)
Teilchendichte	Feuerungseigenschaften (spezifische Wärmeleitfähigkeit, Entgasungsrate)
Feinanteil	Lagerdichte, Lagerfähigkeit, Staubbildung
Abriebfestigkeit	Entmischung, Verluste
Brückenbildungsneigung	Rieselfähigkeit, Störungen bei Umschlagprozessen

Bei der Verbrennung müssen die Grenzwerte des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) und seiner Verordnungen bzw. der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) eingehalten werden. Für kleine und mittlere Anlagen unter 100 kW Feuerungswärmeleistung sind die Grenzwerte der 1. BImSchV - Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Verordnung über kleinere und mittlere Feuerungsanlagen - bindend. Landwirtschaftliche Biomassen, die nach 1. BImSchV für die Verbrennung in Feuerungsanlagen unter 100 kW Leistung in Frage kommen, sind in § 3 1. BImSchV definiert und beinhalten unter anderem Stroh, ähnliche pflanzliche Stoffe, nicht als Lebensmittel bestimmtes Getreide (Nr. 8) und sonstige nachwachsende Rohstoffe (Nr. 13), die die Anforderungen nach Absatz 5 einhalten. Die Grenzwerte der 1. BImSchV bzw. TA Luft für Stroh und ähnliche pflanzliche Stoffe, welche nach Neuerrichtung im Rahmen der wiederkehrenden Prüfung von Zentralfeuerungsanlagen in der Praxis einzuhalten sind, zeigt Tabelle 5.

Tabelle 5: Grenzwerte nach 1. BImSchV und TA-Luft

Parameter	1. BImSchV*		TA-Luft**
	aktuell	ab 2015	Nr. 5.4.1.3 Anlagen der Nr. 1.3
Wärmeleistung	$4 \leq x \leq 100 \text{ kW}$	$4 \leq x \leq 100 \text{ kW}$	ab 100 kW
Staub bzw. staubförmige Emissionen (bei TA-Luft)	0,1 g/Nm ³	0,02 g/Nm ³	50 mg m ⁻³
CO	1,0 g/Nm ³	0,40 g/Nm ³	0,25 g m ⁻³
NO_x			0,50 g m ⁻³
Ges.-C			50 mg m ⁻³
allgemeine Grenzwerte			
SO₂			0,35 g m ⁻³
HCl			30 mg m ⁻³
PCDD/F			0,1 ng m ⁻³ I-TEQ

* 13 Vol.-% Sauerstoffbezug

** 11 Vol.-% Sauerstoffbezug

Es ist dabei generell zu unterscheiden, in welchem Leistungsbereich derartige Anlagen mit welchen konkreten Brennstoffen zum Einsatz kommen sollen. Weiterhin kommen beim Einsatz von Halmgütern im Leistungsbereich unter 100 kW für die Typenprüfung von Feuerungsanlagen weitere Grenzwerte hinzu, welche auf dem Prüfstand nachgewiesen werden müssen (z.B. NO_x, PCDD/F). Das Einhalten dieser Grenzwerte ist mit hohen Anforderungen an die Feuerungstechnik und Verbrennungsführung (ELSÄßER, 2004; HERING ET AL., 2005; LAUNHARDT ET AL., 2000; PEISKER ET AL., 2007; PEISKER, 2007) verbunden.

Richtwerte für Heu, das für die thermische Nutzung bestimmt ist, sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Richtwerte für die thermische Nutzung von Heu (nach HOFFMANN ET AL., 2010) ohne Angaben zur Art des Heus und des Stichprobenumfanges)

Parameter	Einheit	Richtwert
Wassergehalt	% in FM	7,97
TM-Gehalt	% in FM	92,03
Aschegehalt	% in TM	8,78
C	% in TM	46,42
H	% in TM	6,94
N	% in TM	1,27
O	% in TM	40,76
Cl	% in TM	0,16
Heizwert	MJ kg ⁻¹ TM	16,49

Heu stellt ähnliche Anforderungen an die Verbrennungstechnik wie Stroh (ELSÄßER, 2004) und Strohverbrennungsanlagen werden bereits in der Praxis betrieben. So kann Heu durch technische Anpassungsmaßnahmen der Strohöfen unter Einhaltung der Emissionsgrenzwerte verbrannt werden (OECHSNER UND MAURER, 2004).

Rohfaser und im speziellen Lignin besitzt, aufgrund der Molekülstruktur, einen höheren Anteil von Kohlenstoff pro betrachteter Einheit als andere organische Verbindungen, d.h. der Ligningehalt eines Brennstoffes beeinflusst durch eben diesen höheren Kohlenstoffgehalt den Heizwert positiv (DÖRING, 2010)

Der Gehalt an Rohasche hat einen Einfluss auf die Staubemissionen, die Auslegung von Ascheaustragssystemen sowie die Rückstandsbildung und -verwertung (vgl. Tabelle 4). Die Elemente Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff beeinflussen neben Schwefel und Stickstoff den Heizwert (FRITSCHKE ET AL., 1989). Die Elemente Kalium, Kalzium und Magnesium sind für das Ascheerweichungsverhalten entscheidend, wobei Kalium neben Chlor und Schwefel an der Korrosion von Anlagenteilen beteiligt ist. Die Elemente Chlor und Schwefel sowie Stickstoff besitzen weiter eine hohe Relevanz für die Verursachung von Emissionen. Für die Ascheverwertung und die Schwermetallemission spielen die Elemente Arsen, Cadmium, Blei, Chrom, Nickel, Quecksilber, Zink und Thallium eine Rolle.

2.4 Möglichkeiten der Biomasseverwertung aus verbrennungstechnischer Sicht

In Tabelle 7 ist eine Übersicht über die verbrennungsrelevanten Inhaltsstoffe verschiedener halmgutartiger Brennstoffe, verschiedener Herkunft sowie Bewirtschaftungsweisen und -intensitäten dargestellt. Zusätzlich sind zum Vergleich die Inhaltsstoffe von Stroh und Holz mit aufgelistet.

Tabelle 7: Übersicht verbrennungsrelevanter Inhaltsstoffe halmgutartiger Brennstoffe verschiedener Herkünfte und Bewirtschaftungsweisen einschließlich Stroh und Holz

Parameter	Stickstoff	Schwefel	Chlor	Kalium	Kalzium	Asche	Heizwert	Sinterbeginn	Erweichungs- punkt
	% TM	% TM	% TM	% TM	% TM	% TM	MJ kg ⁻¹ TM	°C	°C
Futterwiese intensiv (RÖSCH ET AL., 2007)	2,0 - 3,0	0,14 - 0,16	0,30 - 1,40	1,50 - 2,00	0,40 - 0,50	5,00 - 9,00	16,4 - 17,4	840 - 1020	870 - 1060
Futterwiese extensiv (RÖSCH ET AL., 2007)	1,5 - 2,0								
Streuwiese (RÖSCH ET AL., 2007)	0,4 - 0,6								
extensives Grünland (TONN ET AL., 2010)	1,03 - 1,74	0,15 - 0,35	0,17 - 1,12	0,84 - 2,42	0,67 - 1,49	6,10 - 9,90			
Landschafts- pflegeheu (RÖSCH ET AL., 2007)	1,14		0,31	1,49	0,50	5,70	17,4	1017	1061
Straßengras- schnitt (RÖSCH ET AL., 2007)	1,49		0,88	1,30	2,38	23,10	14,1	1181	1200
Rohrschwengel (RÖSCH ET AL., 2007)	0,87		0,50	1,94	0,38	8,50	16,4	840	869
Weidelgras (RÖSCH ET AL., 2007)	1,34		1,39	1,50		8,80	16,5		
Schilf (WICHMANN UND WICHTMANN, 2009)	0,36 - 0,57	0,10 - 0,20	0,23			2,28 - 5,10	16,7 - 17,3		1050 - 1160
Rohrglanzgras (WICHMANN UND WICHTMANN, 2009)	0,95 - 1,45	0,11 - 0,34	1,39			6,41 - 11,15	15,6 - 16,9		960 - 1183
Rohrglanzgras (PROCHNOW ET AL., 2009A)	0,59 - 1,33	0,09 - 0,56	0,08 - 0,56	0,25 - 1,23	0,20 - 0,35	4,40 - 6,40	17,6 - 17,9		
Wiesenfuchsschwanz- und Rohrglanzgras-Gesellschaft (PROCHNOW ET AL., 2009A)	0,74 - 1,81	0,09 - 0,17	0,51 - 1,16	0,21 - 1,78	0,25 - 0,54	4,10 - 6,90	17,5 - 18,0		
Heu aus Federseeried (ELSÄßER, 2004)	1,45 - 1,76	0,14 - 0,18	0,09 - 0,43	0,52 - 1,48	0,36 - 0,68	4,00 - 6,00	16,6		1020
Halbtrockenrassen (TONN ET AL., 2008B)	1,55 - 1,76	0,15 - 0,17	0,29 - 0,34	1,20 - 1,43	0,69 - 0,85	8,06 - 8,80			
Glatthaferwiese (TONN ET AL., 2008B)	1,29 - 1,54	0,13 - 0,15	0,25 - 0,28	1,01 - 1,50	0,59 - 1,42	5,96 - 8,97			
Stroh (RÖSCH ET AL., 2007)	0,40 - 0,60	0,05 - 0,10	0,30 - 0,80	1,00 - 1,80	0,30 - 0,40	5,00 - 6,00	17,1 - 17,6	815 - 890	885 - 930
Stroh (HERING ET AL., 2008) (n=204)	0,22 - 1,27	0,04 - 0,19	0,02 - 1,69	0,43 - 3,76	0,20 - 0,85	2,60 - 12,80			
$\bar{x} =$	0,58	0,10	0,39	1,77	0,37	6,53			
Holz (RÖSCH ET AL., 2007)	0,15	0,015	0,005	0,14	0,5	0,5	18,5	1190	1425

Durch die, im Vergleich zu Holz, überwiegend höheren Gehalte an besonders emissionsrelevanten Inhaltsstoffen und des niedrigeren Ascheschmelzpunktes, stellen besonders halmgutartige Brennstoffe hohe Anforderungen an die Verbrennungstechnik, um eine schadstoffarme Verbrennung zu gewährleisten (LAUNHARDT ET AL., 2000). Es ist deshalb ein wesentlich höherer Aufwand bei der Feuerungstechnik bzw. der Abgasreinigung für die Einhaltung der Emissionswerte nötig (HERING ET AL., 2005; PEISKER ET AL., 2007; PEISKER, 2007; ELSÄßER, 2004). Besonders betroffen sind die Emissionen, die aus den Inhaltsstoffen Stickstoff, Schwefel, Chlor und Asche entstehen (HERING ET AL., 2005; LAUNHARDT ET AL., 2000; PEISKER ET AL., 2007; PEISKER, 2007). Durch die höheren Chlorgehalte in halmgutartigen Brennstoffen im Gegensatz zu Holz, ist das Bildungspotenzial für die Entstehung von Chlorwasserstoff (HCl) und damit gegebenenfalls die Bildung von hochtoxischen organischen Verbindungen wie z.B. Dioxinen und Furanen erhöht (HARTMANN ET AL., 2000; LAUNHARDT ET AL., 2000). Neben bestimmten Temperaturbereichen und den allgemeinen Ausbrandbedingungen (CO-Emission) spielen für die Dioxin- und Furanbildung Kupfer- und Eisenchloride eine wichtige Rolle. Schwefel kann die katalytische Wirkung der Kupferoxide verändern und inaktivieren. Schon ein Cl/S-Verhältnis von 1 hat eine PCDD/F mindernde Wirkung und bei einem Cl/S-Verhältnis von kleiner 0,1 kann die Chlorierung von Aromaten unterbunden werden (HARTMANN ET AL., 2000). Weniger vom Brennstoff ist dagegen der Schwermetallaustrag abhängig (LAUNHARDT ET AL., 2000). Unter den Schwermetallen sind besonders Blei, Zink und Cadmium leicht flüchtig. Durch eine getrennte Entsorgung bzw. Verwertung der Bett-, Zyklon- und Feinstflugasche lässt sich aber das Schadstoffeintragungsrisiko bei der landwirtschaftlichen Verwertung der Aschen als Dünger reduzieren (HARTMANN ET AL., 2000). Um eine sichere Verbrennung ohne Schlackebildung zu gewährleisten, kann durch die Verwendung von wassergekühlten Rosten, Brennraumoberflächen oder eines wassergekühlten Glutbettes die Temperatur im Glutbett begrenzt und der Ascheaustrag aus dem Feuerraum sichergestellt werden (ELSÄßER, 2004; OECHSNER UND MAURER, 2004; PEISKER ET AL., 2007; PEISKER, 2007). Zusätzlich sollte eine Druckstoßabreinigung im Wärmetauscher zur Gewährleistung des Dauerbetriebs und eine Staubfilterung zur Abscheidung salzartiger Stäube vorhanden sein (ELSÄßER, 2004).

Die Abhängigkeit der Brennstoffqualität vom Schnittzeitpunkt untersuchten TONN ET AL. (2008a) bei den Dauergrünlandtypen Kalkmagerrasen, Salbei-Glatthaferwiese, typische Glatthaferwiese, Kohldistel-Glatthaferwiese und Großseggenried in Baden-Württemberg. Die Brennstoffqualität wurde anhand der Stickstoff-, Kalium-, Kalzium-, Chlor- und Aschegehalte bestimmt. Die Stickstoffgehalte nahmen nur bei den Kalkmagerrasen und dem Großseggenried in Abhängigkeit der Schnittzeitpunkte bis zu 0,5 % ab, blieben aber trotzdem auf hohem Niveau. Bei der Ernte zwischen Juni und Oktober zeigten die Chlorgehalte keine nennenswerten Schwankungen, dafür variierten die Gehalte teils erheblich zwischen den Standorten. Die Kaliumgehalte in den Aschen nahmen über den gesamten Zeitraum kontinuierlich ab, während die Aschegehalte der Trockensubstanz annähernd konstant blieben. Dagegen zeigten die Kalziumgehalte der Asche keine Abhängigkeit vom Schnittzeitpunkt sondern blieben relativ konstant. Die Trockenmasseerträge der meisten Standorte waren in Abhängigkeit der Schnitttermine zwischen Juni und Oktober weitgehend gleich und zeigten nur einen geringen Ertragsrückgang bei den Schnitterminen Oktober und Dezember, allerdings bei zunehmendem Lager einiger Dauergrünlandtypen und damit verbunden höheren Verlusten bei praxisüblicher Beerntung.

3 Material und Methoden

3.1 Dauergrünlandtypen und Standorte

Pflanzengesellschaften

Für die Versuche wurden fünf naturschutzfachlich wertvolle Dauergrünlandtypen gewählt, welche typisch für große Grünlandgebiete in Deutschland sind. Vor Versuchsbeginn erfolgte eine vegetationskundliche Aufnahme der Flächen. Anhand dieser Vegetationsaufnahmen lassen sich folgende Pflanzengesellschaften für die Versuchsstandorte ableiten.

- Elsfleth (NI): Schnabelseggenried (**Großseggenried**) (*Caricetum rostratae*)
- Ebereschenhof (BB): **Rohrglanzgrasröhricht** (*Phalaridetum arundinaceae*)
- Oelsnitz (SN): Waldengelwurz-**Kohldistel**-Feuchtwiese
(*Angelico sylvestris*-*Cirsietum oleracei*)
- Oberweißbach (TH): Waldstorchschnabel-**Goldhaferwiese**
(*Geranio sylvatici*-*Trisetum flavescens*)
- Immenstadt (BY): Pfeifengras-**Streuwiese** (*Molinion caeruleae*)

Das **Großseggenried**, beherrscht von Schnabelsegge (*Carex rostrata*) und Blasensegge (*Carex vesicaria*), befindet sich als flächige Ausbildung im Deichvorland der Hunte bei Oldenburg auf einen Flussmarschstandort und unterliegt überschwemmungsbedingt starken Wasserschwankungen. Als Wiesenbrüterschutzgebiet darf die Fläche nicht vor dem 1. Juli beemtet werden.

Das **Rohrglanzgrasröhricht** stockt als flächige Ausbildung auf einer grundwassernahen flachgründigen Niedermoor-Wiese (30 cm Moorauflage über Talsand) im Havelländischen Luch mit lang anhaltender Überstauung im Winterhalbjahr und auch während der Vegetationsperiode in regenreichen Jahren.

Die **Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese** ist ein vom Mädesüß überprägter, mehrjährig brachgefallener Bestand in einem nassen Kerbsohlental im Sächsischen Vogtland.

Die **Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese**, in ihrer typischen Ausbildungsform vorliegend, befindet sich als Mähwiese auf einer gründigen Schieferschutt-Braunerde in Nordhanglage im Thüringer Schiefergebirge in 690 m über NN.

Die **Pfeifengras-Streuwiese** liegt im bayerischen Alpenvorland auf einer ständig wasserdurchdrängten Talwiese (Anmoor).

Für die Bewertung der untersuchten Pflanzenbestände werden die Gesamtartenzahl, der Grünlandwert des Bestandes sowie die Zusammensetzung des Pflanzenbestandes und deren Veränderungen im Verlauf der Versuchsperiode zugrunde gelegt (Tabelle 26 sowie im Anhang die Tabellen A 1 bis A 5).

Der Grünlandwert (G-Wert) spiegelt die naturschutzfachliche Wertigkeit des Bestandes wider. Naturschutzfachlich wertgebende Arten des Dauergrünlandes erhalten einen Zeigerwert und die Summe der Zeigerwerte der vorgefundenen Arten bildet den Grünlandwert eines Bestandes. Der G-Wert als naturschutzfachliche Wertzahl (HOCHBERG ET AL., 2008) korrespondiert mit der Anzahl wertgebender Arten und deren naturschutzfachlicher Wertigkeit.

Inwieweit das Nutzungssystem die Habitatqualität, d.h. die Attraktivität des Pflanzenbestandes für die verschiedensten faunistischen Artengruppen beeinflusst, kann anhand der Struktur eines Bestandes bewertet werden. Die tatsächliche Anwesenheit zahlreicher Tierarten hängt von vielen bewirtschaftungsunabhängigen Faktoren ab. Als Indikatoren für die Struktur eines Dauergrünlandbestandes werden ein Schichtungsindex sowie der Ertragsanteil (EA) an Kräutern herangezogen. Der Schichtungsindex wird anhand der EA der Arten, die der Ober-, Mittel- bzw. Unterschicht zuzuordnen sind, wie folgt berechnet:

$$\text{Schichtungsindex} = (\text{Mittelwert der beiden Schichten mit den geringsten Anteilen}) \times 3$$

Der Index erreicht Werte zwischen 0 und 100. Hohe Werte kennzeichnen einen Bestand mit starker Differenzierung, während niedrige Werte die Tendenz zur Einschichtigkeit anzeigen.

Boden-Nährstoffversorgung

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Bodenuntersuchungen (0 – 10 cm Tiefe) vor Versuchsbeginn an allen Standorten dargestellt.

Tabelle 8: pH-Wert und P, K, Mg-Gehalt im Boden zu Versuchsbeginn in 0 - 10 cm Tiefe

Pflanzengesellschaft/Standort	pH-Wert	P mg 100 g ⁻¹ Boden	K mg 100 g ⁻¹ Boden	Mg mg 100 g ⁻¹ Boden
Schnabelseggenried Elsfleth	4,8	6,0	4,0	10,0
Rohrglanzgrasröhricht Ebereschenhof	7,0	11,6	12,9	21,4
Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese Oelsnitz	5,2	1,2	6,8	30,2
Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese Oberweißbach	5,8	3,8	8,6	k.A.*
Pfeifengras-Streuwiese Immenstadt	4,6	3,5	28,4	29,8

* im Versuchszeitraum nicht untersucht, da auch ohne Düngung langjährig Gehaltsklasse E vorlag

Der pH-Wert an den feuchten Standorten mit mineralischen Boden (Elsfleth, Oelsnitz und Immenstadt) lag standortbedingt im sauren bis schwach sauren Bereich. Dagegen lag am Standort Oberweißbach, durch eine turnusmäßige Kalkung alle sechs Jahre, der pH-Wert in einem für den Standort optimalen Bereich. Der Niedermoorstandort Ebereschenhof hatte eine standortbedingte neutrale Bodenreaktion.

Die Phosphatgehalte im Boden schwankten in Abhängigkeit des Standortes durch die entsprechenden Humusgehalte und Wasserverhältnisse.

Auch bei den Kaliumgehalten zeigten sich extreme Schwankungen zwischen den Standorten. Die hohen Gehalte in Immenstadt sind durch die Mineralisierung des Ausgangsgesteins (Kalkalpen) bedingt. In Ebereschenhof und Oberweißbach ist die vergleichsweise gute Versorgung bewirtschaftungsbedingt. An den Standorten Elsfleth und Oelsnitz ist der Kaliumgehalt standortbedingt eher gering.

Der Magnesiumgehalt war mit Ausnahme des Standortes Elsfleth an allen anderen Standorten sehr hoch.

Witterung

Der Witterungsverlauf während der drei Versuchsjahre sowie die langjährigen Mittel an den Versuchsstandorten sind in Abbildung 1 (Niederschläge) und Abbildung 2 (Temperatur) dargestellt.

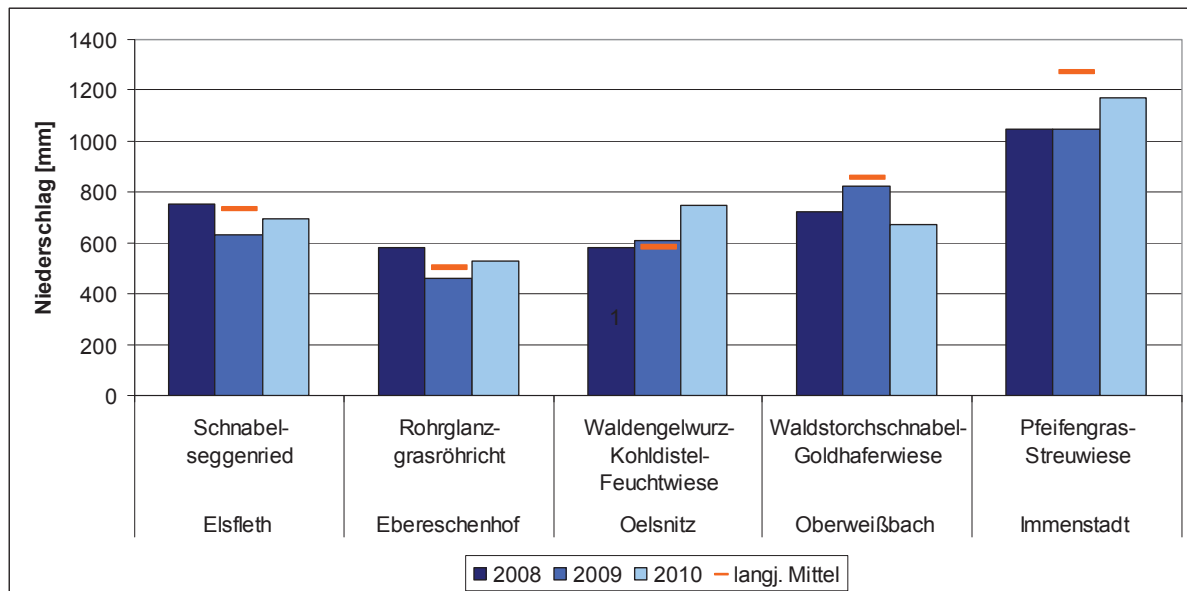


Abbildung 1: Jahresniederschläge in den Versuchsjahren 2008 bis 2010 und die langjährigen Mittel der fünf Versuchsstandorte (in mm)

Der niederschlagreichste Versuchsstandort war Immenstadt mit 1 274 mm Jahresniederschlag im langjährigen Mittel. In allen drei Versuchsjahren unterschritten aber die Jahresniederschläge das langjährige Mittel und lagen zwischen 82 % und 92 %. Die Standorte Oberweißbach und Elsfleth hatten mit 857 mm und 733 mm im langjährigen Mittel die nächst höheren Jahresniederschläge. Dabei lagen in den drei Versuchsjahren in Oberweißbach die Niederschläge zwischen 79 % und 96 %, in Elsfleth zwischen 86 % und 103 % des langjährigen Mittels. Die trockensten Versuchsstandorte waren Oelsnitz mit 581 mm und Ebereschenhof mit 502 mm Jahresniederschlag im langjährigen Mittel. In den drei Versuchsjahren lagen am Standort Oelsnitz die Jahresniederschläge zwischen 101 % und 128 %, am Standort Ebereschenhof zwischen 92 % und 116 % des jeweils langjährigen Mittels.

Demnach war es im Versuchszeitraum an den Standorten Immenstadt, Oberweißbach und Elsfleth trockener, mit Defiziten zwischen 5 % und 14 % im Mittel der drei Versuchsjahre gegenüber dem langjährigen Mittel. An den anderen beiden Standorten Ebereschenhof und Oelsnitz waren mit 4 % bzw. 11 % die Niederschlagsmenge im Mittel der drei Versuchsjahre höher im Vergleich zum langjährigen Mittel.

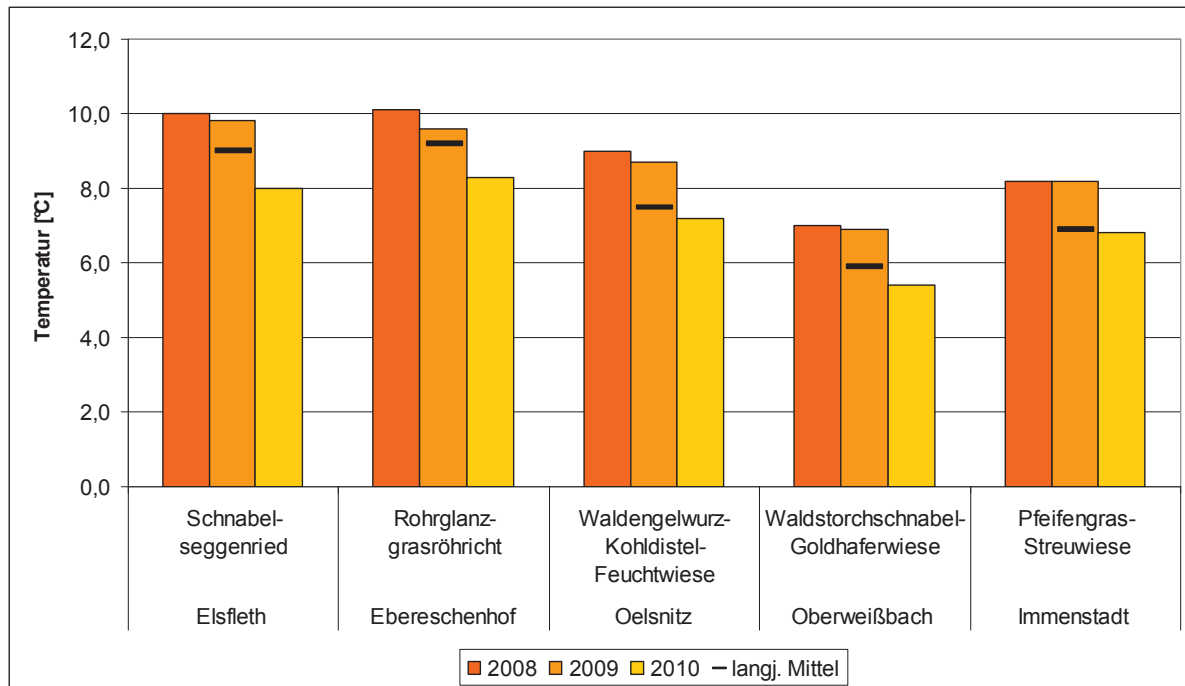


Abbildung 2: Jahresdurchschnittstemperaturen der Versuchsjahre 2008 bis 2010 und die langjährigen Mittel der fünf Versuchsstandorte (in °C)

Die wärmsten Versuchsstandorte waren Ebereschenhof mit 9,2 °C und Elsfleth mit 9,0 °C Durchschnittstemperatur im langjährigen Mittel. Die kältesten Standorte waren Immenstadt mit 6,9 °C und Oberweißbach mit 5,9 °C Durchschnittstemperatur im langjährigen Mittel. Oelsnitz lag mit einer Durchschnittstemperatur von 7,5 °C im langjährigen Mittel zwischen den anderen vier Standorten.

An allen Standorten lagen die Jahresdurchschnittstemperaturen in den ersten beiden Versuchsjahren, 2008 und 2009, über dem langjährigen Mittel. Dabei betrugen die Abweichungen zwischen 0,9 °C und 1,5 °C im ersten und zwischen 0,4 °C und 1,3 °C im zweiten Versuchsjahr. Das dritte Versuchsjahr war an allen Standorten zu kalt. Dabei wichen die Temperaturen zwischen -0,1 °C und -1,0 °C gegenüber dem langjährigen Mittel ab. Über alle drei Jahre lagen die Abweichungen zwischen 0,1 °C (Ebereschenhof) und 0,8 °C (Immenstadt und Oelsnitz).

3.2 Methode

3.2.1 Feldversuche und statistische Methoden

Bei der Versuchsanlage handelte es sich um eine randomisierte Blockanlage mit vier Wiederholungen pro Variante. Die Varianten unterschieden sich in Abhängigkeit vom Dauergrünlandtyp sowohl in der Schnitthäufigkeit als auch in den Schnittzeitpunkten und der Düngung. In Tabelle 9 sind die Schnitthäufigkeit, die Schnitttermine und die Düngung für die jeweiligen Dauergrünlandtypen aufgelistet. Eine Düngung erfolgte nur bei der Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese und dem Rohrglanzgrasröhricht. Bei der 4. Variante erfolgte eine Beerntung nur alle zwei Jahre. Dazu wurde 2008 bei dieser Variante ein Räumungsschnitt vorgenommen, um 2010 die zweijährigen Aufwüchse korrekt bewerten zu können.

Tabelle 9: Nutzungssysteme der untersuchten Pflanzengesellschaften (Schnittregime und Düngung)

Nutzungs- variante	Schnitthäufigkeit/Schnitttermine*		Düngung		
	1. Schnitt	2. Schnitt	N kg ha ⁻¹	P kg ha ⁻¹	K kg ha ⁻¹
Schnabelseggenried					
1	02. Juli	30. September			
2	09. August				
3	30. September				
4	18. August				
Rohrglanzgrasröhricht					
1	13. Juni	27. September			
2	13. Juni	27. September			140
3		27. September			
4	28. September				
Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese					
1	03. Juli	01. Oktober			
2	01. August	24. Oktober			
3	17. August				
4	19. August				
Waldstorcheschnabel-Goldhaferwiese					
1	22. Juni	07. September	60	20	150
2	22. Juni	07. September		20	110
3	22. Juni	07. September			
4	17. September				
Pfeifengras-Streuwiese					
1	18. August				
2	13. September				
3	17. Juli	13. September			
4	17. September				

* Schnitttermine über die drei Versuchsjahre gemittelt

Für die Vor-Ort-Bestimmung der Trockensubstanz bei 105 °C wurden parzellenweise 250 g Probenmaterial bei der Ernte entnommen. Für die Analyse der Inhaltsstoffe der Proben wurden prüfgliedweise 1000 g repräsentativ entnommen, bei 60 °C getrocknet und mit Probenbegleitzettel an die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft nach Jena verschickt. Zusätzlich wurden bei der Ernte die Wuchshöhe des Bestandes, die Entwicklungsstadien der Leitkulturen nach BBCH und die Feuchte des Erntegutes zur Ernte ermittelt. Die Probenaufbereitung und -analyse erfolgte zentral in der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft in Jena.

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Statistik-Programmpaket SAS 9.2. Für den Mittelwertsvergleich der Trockenmasseerträge nach Varianten wurde eine multivariate Varianzanalyse (proc glm) gewählt.

Da für die Inhaltsstoffanalyse nur eine Mischprobe der vier Wiederholungen prüfgliedweise durchgeführt wurde, konnte keine statistische Verrechnung der Inhaltsstoffe erfolgen. Somit werden die dreijährigen einfachen Mittelwerte der Inhaltsstoffe verwendet.

3.2.2 Laboranalysen

Die Laboranalysen im akkreditierten LUFA-Labor der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft umfassen folgendes Spektrum:

- Trockensubstanzgehalt
- Elementarbestimmung von C, H, N
- Röntgenfluoreszenzanalyse (Makro- und Mikronährstoffe sowie Spurenelemente)
- Weender Analyse: Rohasche, Rohfaser, Rohprotein, Rohfett, ADF_{org}, Lignin
- Verdaulichkeit anhand der enzymlöslichen organischen Substanz (ELOS)
- Schwermetalle wie As, Hg, Cr, Cd, Pb, Ti
- Heizwert (Bombenkalorimeter)
- Quarzanteil (Sandgehalt, säureunlösliche Bestandteile der Asche)

Das Ascheschmelzverhalten von ausgewählten Aufwüchsen ist bei EUROFINS Umwelt Ost GmbH Niederlassung Freiberg nach DIN CEN/ TS 15370-1 untersucht worden.

Der Energiegehalt des Grünfutters wurde mit der Schätzformel (2007) anhand der erweiterten Weender Rohnährstoffe und des ELOS-Wertes berechnet. Die eingesetzten Parameter in der Formel werden in g kg⁻¹ Trockenmasse angegeben.

$$ME = 5,51 + 0,00828 * ELOS - 0,00511 * XA + 0,02507 * XL - 0,00392 * ADF_{org}$$

Für die Berechnung der Nettoenergie-Laktation wurde ein Wirkungsgrad von 0,61 unterstellt.

3.2.3 Verbrennungsversuche Quader-Großballen in einer Praxisanlage

Das ILK Dresden wurde mit der Abbranduntersuchung für den Brennstoff Heu (Glatthaferwiese) an der Heizkesselanlage eines Landwirtschaftsbetriebes beauftragt, womit die Durchführung unter Bedingungen ähnlich der Überwachungsmessung mit einer zugelassenen Messstelle nach § 26 BImSchG qualitätsgerecht sichergestellt werden konnte.

Um Tendenzen bei längerem Brennstoffeinsatz zu erkennen und diese sicher zu bewerten, erfolgte die Durchführung in drei einzelnen, jeweils über mehrere Stunden gehenden Versuchen, an drei Tagen bei Nennlast des Heizkessels. Zusätzlich wurden an jedem Versuchstag je eine Messung beim An- und Abfahren und drei Messung im Nennlastzustand des Heizkessels mit Abscheider am 3. Versuchstag durchgeführt (Prototypanlage eines vorangegangenen Projektes, siehe (HERING UND PEISKER, 2009).

Für die Charakterisierung der Emissionen beim Abbrand des Heus wurden die folgenden Rauchgasparameter festgelegt:

- Gasförmige Emissionen:
 - CO , SO₂, HCl, NO_x, NH₃, N₂O (Zusatz)
- Staubbörmige Emissionen:
 - Gesamtstaubgehalt
- Hochtoxische Verbindungen:
 - PCDD/F.

Bei der Kesselanlage handelt es sich um einen Reka-Heizkessel (Modell HKRST 60/3) mit einer Nennleistung von 49 kW. Sie dient der Wärmeversorgung der vorhandenen Wohn- und Stallgebäude. Der Regelbrennstoff im Normalbetrieb ist Stroh, das über einen Ballenauflöser grob zerkleinert und mit Förderschnecken in den Brennraum des Kessels transportiert wird. Die Zugabe der Primärluft erfolgt über Öffnungen im Schubrost (Brennraumboden). Die Sekundärluft wird durch Düsenlanzen im oberen Bereich des Brennraums zugegeben. Die

Nachverbrennung erfolgt oberhalb des Brennraums in einer schamottierten Nachbrennkammer. Verbleibende Asche wird über einen Vorschubrost kontinuierlich in den vorderen Teil des Kessels gefördert und kann von Hand entnommen werden. Die Übertragung der thermischen Energie des heißen Rauchgases an das Heizwasser erfolgt über einen liegenden, 2-zügigen Rohr-Wärmeübertrager im oberen Teil des Kessels. Zusätzlich ist die Anlage mit einem Abscheider-Prototyp ausgerüstet, der manuell über einen Bypass mit Zusatzlüfter eingekoppelt werden kann. Dies erlaubt den Betrieb der Heizanlage mit und ohne Abscheider. Im normalen Betrieb beträgt der Abgasvolumenstrom des Heizkessels ca. $250 \text{ m}_B^3 \text{ h}^{-1}$.

Auf Grund der Kesselnennleistung von 49 kW gelten die Grenzwerte der 1. BImSchV für die Parameter Kohlenmonoxid und Gesamtstaub. Um das erweiterte Spektrum der Parameter im Sinne einer Messung zur Typenprüfung, nach Anlage 4 Nr. 2 der 1. BImSchV für Brennstoffe nach § 3 Nr. 13 ebenfalls 1. BImSchV, zu messen, wurden alle Emissionsermittlungen mit einem Messaufbau gemäß der TA Luft durchgeführt. Dieser Messaufbau entspricht auch den Anforderungen der Anlage 4 Nr. 3 der 1. BImSchV.

Die Probeentnahme erfolgte an den vorhandenen Messstutzen der Anlage, womit eine repräsentative Erfassung der Emissionsparameter möglich war (BIRNBAUM UND BERGER, 2010).

Die Zeitdauer für die Probenahme, vor allem für die Gesamtstaubmessung, betrug 30 Minuten. Die Bestimmung der gasförmigen Emissionsparameter erfolgte kontinuierlich. Zur Beurteilung des Zustands der Kesselanlage während der Versuche wurde die angebrachte Leistungsmesstechnik genutzt. Diese umfasst einen Wärmemengenzähler, ein elektronisches Thermometer der Kesselregulierung und ein mechanisches Thermometer im Rücklauf. Auf Grund der erfassten Abgasrandbedingungen konnten Rückschlüsse auf das Leistungsverhalten des Kessels gezogen werden.

Bei der Untersuchung des Heu-Brennstoffs wurde auf Grund der gleichen Brennstoffart (halmgutartiger Brennstoff) zunächst die Grundparametrierung übernommen und zur Beurteilung der Verbrennungsqualität der Kohlenstoffmonoxidgehalt herangezogen. Durch eine gute Verbrennungsqualität nach vergleichsweise kurzer Einfahrtszeit des Heizkessels, konnte die bisherige Parametrierung der Kesselanlage beibehalten werden. Damit lagen bei den Verbrennungsversuchen folgende Kesselparmetrierungen vor:

- Vorlauftemperatur: 90°C
- O_2 – Gehalt Stufe 4: 10 Vol.-%
- Pausenzeit Rost: 5 s
- Programm: PRGM1 (Halmgut)
- Grundparametrierung (ohne Änderungen):
 - Flammtemperatur 103B4: 950°C
 - Flammtemperatur 113B4: 750°C
 - Brennstoffzufuhr: 100 %
 - Sekundärluftmenge: 60 %
 - Primärluft: Min: 10 %, Max: 30 %
 - Unterdruck Brennkammer: 0,6 mbar.

Die analysierten Inhaltsstoffe des verbrannten Heus sind unter Kapitel 4.6 beschrieben.

3.2.4 Biomasseherstellungskosten

Die Berechnung der Biomasseherstellungskosten erfolgte in Anlehnung an DEGNER (2010). Die grundlegenden Annahmen für die Berechnung der Biomasseherstellungskosten sind in Tabelle 10 aufgelistet. Des Weiteren wurde unterstellt, dass aus pflanzenbaulicher Sicht auf den Moorstandorten im Frühjahr die Grasnarbe angewalzt werden muss und das zum Erhalt der Goldhaferwiese alle sechs Jahre eine Kalkung in Höhe von 1,2 t CaO notwendig ist. Für die Heuwerbung wurde unterstellt, dass nach dem Mähen einmal gezettet und anschließend zweimal gewendet wird.

Die Werte für den Arbeitszeitbedarf, die Flächenleistung, die Maschinenkosten sowie für den Dieselbedarf wurden aus der KTBL Online-Datenbank „Feldarbeitsrechner“ im Zeitraum Dezember 2010 bis Februar 2011 entnommen.

Tabelle 10: Annahmen für die Berechnung der Biomasseherstellungskosten

Annahme	Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese (Sachsen) Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese (Thüringen) Pfeifengras-Streuwiese (Bayern)	Schnabelseggenried (Niedersachsen) Rohrglanzgrasröhricht (Brandenburg)
Schlaggröße	1 ha	5 ha
Entfernung Schlag-Hof	5 km	3 km
Mineraldünger (KAS) ausbringen	Düngerförderschnecke ab Hof, loser Dünger, Anbauschleuderstreuer 1,5 m³, 54 kW Schlepper	
Mineraldünger (PK) ausbringen, ab Hof, loser Dünger	Düngerförderschnecke Anbauschleuderstreuer, 1,5 m³; 54 kW	
Kalk streuen, ab Feld 3 t	Frontlader, 1 500 daN; Mineraldüngerschaufel, 0,65 m³; 54 kW Schlepper Anhängeschleuderstreuer, 6 m³; 67 kW Schlepper	
Mähen mit Rotationsmähwerk	2,4 m; 54 kW Schlepper	3 m, angehängt; 67 kW Schlepper
Zetten mit Kreiselzettwender	5,5 m; 54 kW Schlepper	7,5 m; 67 kW Schlepper
Wenden mit Kreiselzettwender	5,5 m; 54 kW Schlepper	7,5 m; 67 kW Schlepper
Schwaden mit Zweikreismittelschwader	6 m; 54 kW Schlepper	7,5 m; 67 kW Schlepper
Bodenheu pressen mit Rundballenpresse	1,5 m, Heu, 320 kg/Ballen; 67 kW Schlepper	1,5 m, Heu, 320 kg/Ballen; 67 kW Schlepper
Rundballentransport, Bodenheu, D = 1,5 m	Doppelzug je 8 t, Dreiseitenkippanhänger; Frontlader, 1750 daN; Ballenspieß; 67 kW Schlepper	Doppelzug je 8 t, Dreiseitenkippanhänger; Frontlader, 1750 daN; Ballenspieß; 67 kW Schlepper
Walzen, Grünland		6 m; 54 kW Schlepper
Trockenmasseverluste während der Ernte	30 %	

Die herangezogenen betrieblichen Preise und Richtwerte für die Berechnung der Biomasseherstellungskosten sind in Tabelle 11 aufgelistet.

Tabelle 11: Annahmen für die Berechnung der Biomasseherstellungskosten in Anlehnung an die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (DEGNER, 2010)

Positionen		Einheiten	Annahmen
nicht termingebundene Arbeiten	Nebentätigkeit	%	50
	Regiestundenzuschlag	%	20
Lohnnebenkosten		%	50
Arbeitskosten		€ ha ⁻¹	9,04
Leistung und Verwaltung		%	45
Lagerhalle für Lagerung Heu	AfA	€ t ⁻¹	16,70
	Reparaturkosten	€ t ⁻¹	2,50
Flächenkosten		€ pro Bodenpunkt Bodenpunkte	1,70 25
Berufsgenossenschaft		€ ha ⁻¹	20,00
sonstiger allgemeiner Aufwand		€ ha ⁻¹	45,00
Bindegarn		kg t ⁻¹	1,75
		€ kg ⁻¹	1,80
Düngemittel	P als Triplesuperphosphat	€ kg ⁻¹ P	1,80
	K als Kornkali	€ kg ⁻¹ K	0,85
	N als Kalkammonsalpeter	€ kg ⁻¹ N	0,85
	CaO als kohlensaurer Magnesiumkalk	€ kg ⁻¹ CaO	0,019

Durch unterschiedliche Agrarumweltprogramme in den einzelnen Bundesländern, wurde auf die Einbeziehung von Fördermitteln bei der Berechnung der Biomasseherstellungskosten verzichtet, um die Vergleichbarkeit der Vegetationstypen zu gewährleisten und nicht die Wertigkeiten aufgrund von unterschiedlicher Förderung zu überlagern.

3.2.5 Modellregionen - Potenzialschätzung, Verwertungsszenarien

3.2.5.1 Beschreibung der Modellregionen

Landkreis Havelland (Brandenburg)

Der Landkreis Havelland (LK HVL) befindet sich im Westen Brandenburgs, zwischen Berlin und Sachsen-Anhalt. Auf einer Fläche von 1 717 km² leben derzeit ca. 155 000 Einwohner (EW). Das Havelland gehört, trotz der für Brandenburg charakteristischen rückläufigen Einwohnerzahlen, zu den demografisch stabilen Landkreisen.

Der größte Teil des Landkreises zählt zum „Benachteiligten Gebiet“ (Abbildung 3).

Insgesamt 70 % der Kreisfläche stehen unter Landschaftsschutz, d.h. doppelt so viel wie im Durchschnitt Brandenburgs. Die Naturschutzgebiete nehmen knapp 14 % der Kreisfläche ein. Die meisten Landschafts- und Naturschutzgebiete befinden sich im Naturpark Westhavelland, dem größten Großschutzgebiet Brandenburgs.

Aufgrund ungünstiger natürlicher Gegebenheiten hat sich die havelländische Landwirtschaft vor allem hin zu Extensivierung und Landschaftspflege entwickelt. So wurde z.B. die Mutter-

kuhhaltung gegenüber der Milchkuhhaltung intensiviert¹. Dadurch werden einerseits energie- reiche und hochqualitative Futtermittel eingespart und andererseits kann eine optimale Pflege ausgewählter Grünlandstandorte gewährleistet werden.

Das Vorhandensein zahlreicher Schutzgebiete macht das Havelland für die Projektuntersuchungen besonders interessant, da gerade auf den Flächen mit Bewirtschaftungsauflagen Probleme mit der Verwertung von meist spät geernteten Aufwüchsen auftreten.

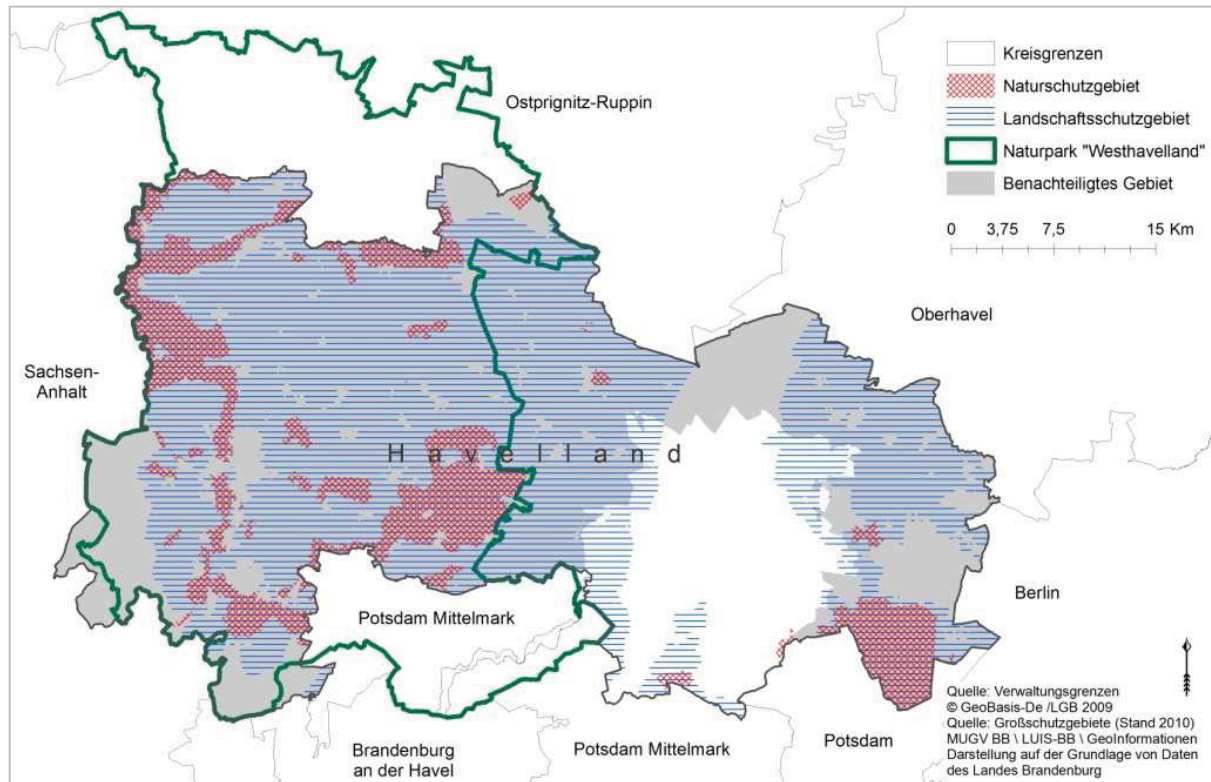


Abbildung 3: Landschaftsschutz-, Naturschutz- und Benachteiligte Gebiete im Havelland

Die havelländische Landschaft ist durch weite Grünlandflächen und Feuchtgebiete geprägt und von Kanälen durchzogen, die teilweise als Wasserstrassen ausgebaut sind (Abbildung 4). Die Havel, der Große Havelländische Hauptkanal und der Rhin mit ihren verzweigten Gewässernetzen bedecken insgesamt 3 % der Kreisfläche, was dem Landesmittel entspricht.

Die landwirtschaftlichen Flächen nehmen 60 % und die Wälder 26 % der Kreisfläche ein. (LBV, 2010).

Die landwirtschaftlichen Flächen sind durch ausgedehnte, grundwasserbeeinflusste Grünlandflächen in den Niederungen und große Ackerflächen in weniger grundwasserbeeinflussten Lagen gekennzeichnet. Grünland ist insbesondere im Norden sowie im Westen, entlang der Havel verbreitet. Die höchste Konzentration an Ackerflächen befindet sich dagegen im östlichen Zentrum des Landkreises. Die hier gelegenen Böden zählen nicht zu den benachteiligten Gebieten und verfügen über sehr gute ackerbauliche Eigenschaften.

¹ Aufgrund der Änderungen in der Erfassung statistischer Daten und der Einführung des Herkunftssicherungs- und Informationssystems für Tiere (HIT) im 2008 ist die Vergleichbarkeit der Tierbestände nur eingeschränkt gegeben. Nichtsdestotrotz zeigen statistische Erhebungen für die Jahre 1996-2009 einen Rückgang der Milchkuhbestände von 15.025 auf 10.812 Tiere und einen Zuwachs in Mutterkuhbeständen von 5.157 auf 7.523 Tiere (LELF, 2010).

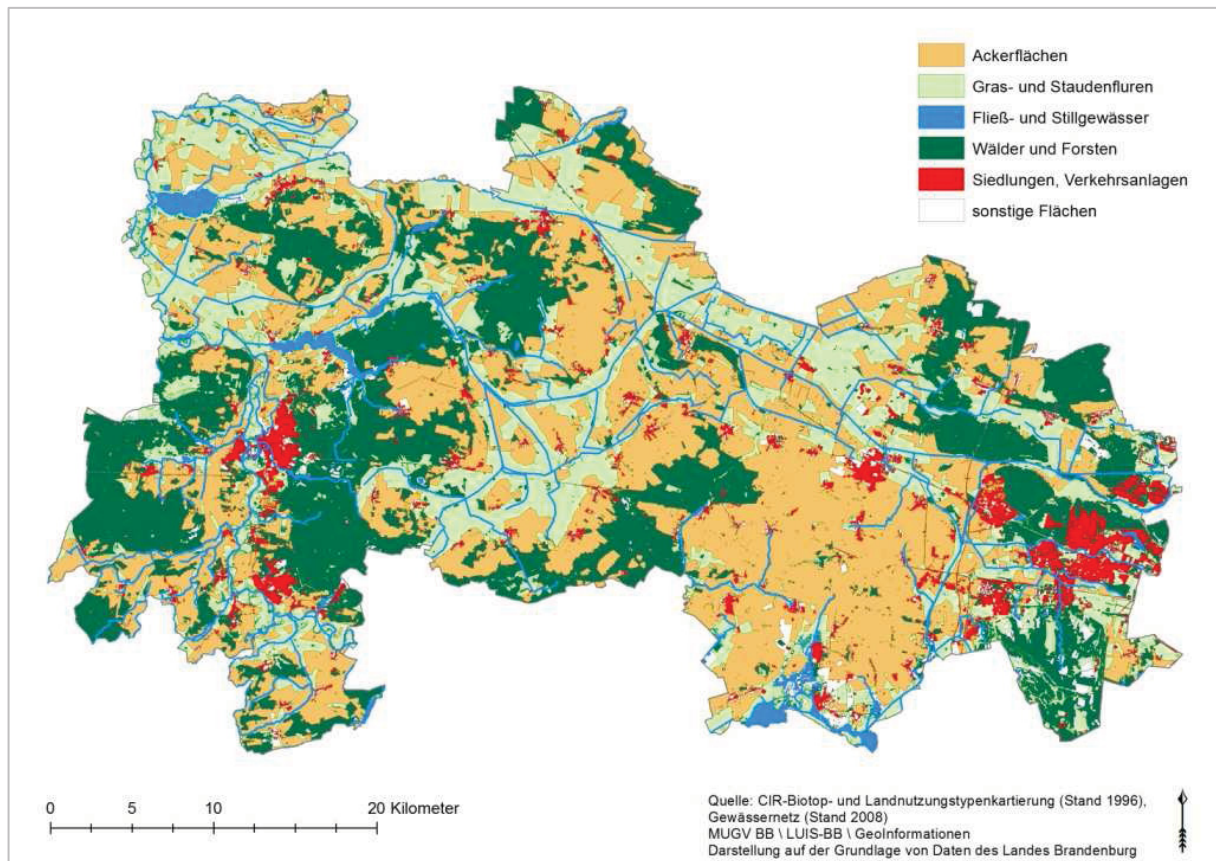


Abbildung 4: Flächennutzung im Landkreis Havelland

Im Rahmen der Agrarförderung wurden 2009 im LK HVL insgesamt 90 443 ha landwirtschaftliche Nutzfläche bewirtschaftet (Angaben aus InVeKoS)². Zwei Drittel davon (60 318 ha) wurden als Ackerland und ein Drittel (29 284 ha) als Grünland genutzt. Außerhalb der Agrarförderung wurden weitere ca. 2 500 ha landwirtschaftliche Acker- bzw. Grünlandflächen überwiegend durch Hobbylandwirte bearbeitet (LANDKREIS HAVELLAND, 2010). In der Pflanzenproduktion dominiert der Anbau von Getreide (in erster Linie Roggen und Weizen), Mais, Ölsaaten und Ackerfutter. Eiweißpflanzen, Hackfrüchte und Gemüse spielen eine untergeordnete Rolle. Die Rinder- und Schweinehaltung findet überwiegend auf ackerbaulich ungünstigen Standorten, insbesondere in der westlichen Hälfte des Havellandes statt. Schafherden sind in einzelnen, über den Landkreis verstreuten Gemeinden anzutreffen. Die Pferdehaltung konzentriert sich in den östlichen, Berlin nahe liegenden Gemeinden.

Die Nutzung von Biomasse zu Energiezwecken ist im LK HVL in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen. Vor allem handelt es sich dabei um Biogasanlagen, die landwirtschaftliche Substrate wie nachwachsende Rohstoffe und Wirtschaftsdünger vergären. Derzeit sind im LK HVL fünfzehn Biogasanlagen in Betrieb (**Abbildung 5**).

² InVeKoS (Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem) sorgt für eine eindeutige Identifizierung landwirtschaftlicher Parzellen und ist ein Kontrollinstrument für die Agrarausgaben der EU.

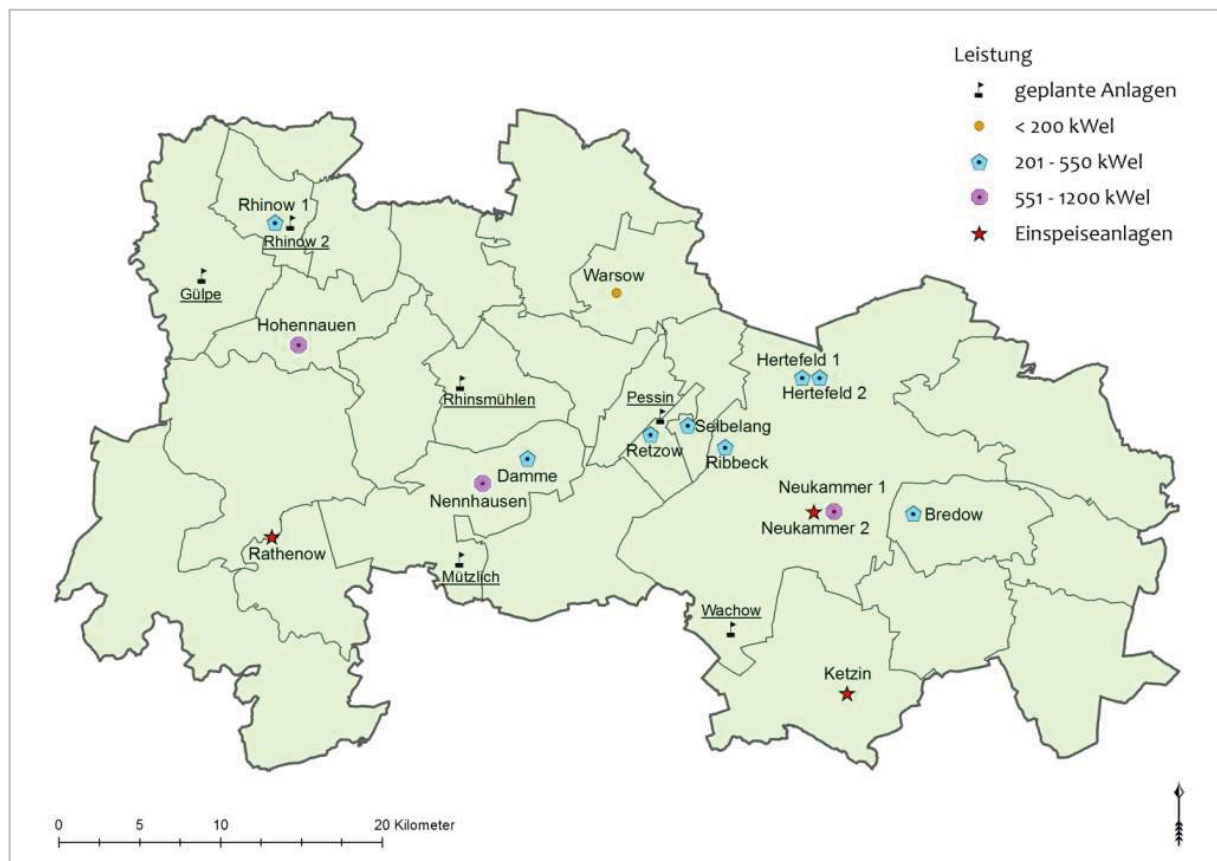


Abbildung 5: Biogasanlagen im Landkreis Havelland (Stand Ende 2010)

Mindestens sechs weitere Anlagen wurden genehmigt und befinden sich in verschiedenen Umsetzungsstadien. Die bei der Stromerzeugung anfallende Wärme kann im eigenen Betrieb genutzt und/oder an Dritte verkauft werden. Der Anbau nachwachsender Rohstoffe auf Ackerland stößt langsam an seine Grenzen (LANDKREIS HAVELLAND, 2009; LELF, 2010). Die ausgedehnten Dauergrünlandflächen bieten hingegen Möglichkeiten einer nachhaltigen und umweltschonenden Energiegewinnung.

Landkreis Saalfeld-Rudolstadt (Thüringen)

Die zweite, bisher im Rahmen des Projektes untersuchte Modellregion ist der Landkreis Saalfeld-Rudolstadt (LK SLF). Der LK liegt im Süden Thüringens und umfasst eine Fläche von 1 035 km². Anfang 2010 wohnten hier 118 303 Menschen (STATISTISCHES LANDESAMT THÜRINGEN, 2010), was einer Bevölkerungsdichte von 114 EW km⁻² entspricht (durchschnittliche Bevölkerungsdichte in Thüringen: 139 EW km⁻²).

Der überwiegende Teil des Landkreises gehört zum „Benachteiligten Gebiet“ (**Abbildung 6**).

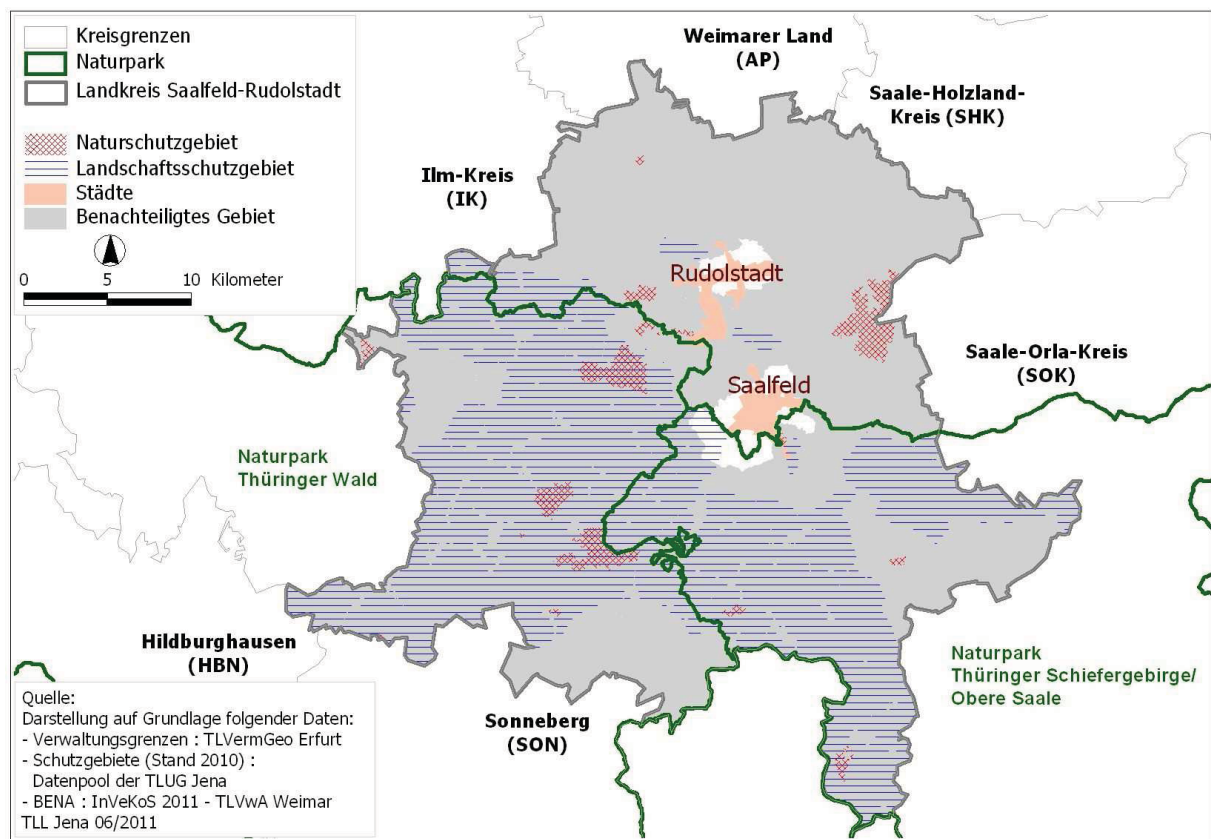


Abbildung 6: Landschaftsschutz-, Naturschutz- und Benachteiligte Gebiete in Saalfeld-Rudolstadt

Die Ausgleichszulage wird in Thüringen nach der Landwirtschaftlichen Vergleichszahl³ (LVZ) gestaffelt (TMLNU, 2007).

Im LK SLF sind 47 % der Kreisfläche als Landschaftsschutzgebiete ausgewiesen. Naturschutzgebiete nehmen 3 % der Fläche ein. Zwei Naturparks, der Thüringer Wald und das Thüringer Schiefergebirge/Obere Saale, bedecken weite Teile im Süden des Landkreises.

Die Flächennutzung geht aus **Abbildung 7** hervor.

³ Die Landwirtschaftliche Vergleichszahl (LVZ) beschreibt die Ertragsfähigkeit landwirtschaftlicher Betriebe. Die LVZ wird aus den natürlichen Ertragsbedingungen (Boden, Klima, Bodennutzung) sowie den einzelnen Betriebscharakteristika (Betriebsgröße, Hof-Feld-Entfernung) errechnet. Je höher die LVZ, desto ertragssicherer und konkurrenzfähiger ist der Betrieb. Die durchschnittliche LVZ liegt in Thüringen bei 39 Punkten, wobei einzelne Landkreise und kreisfreie Städte Durchschnittswerte von 16 bis 55 Punkten aufweisen (TLUG, 2011)

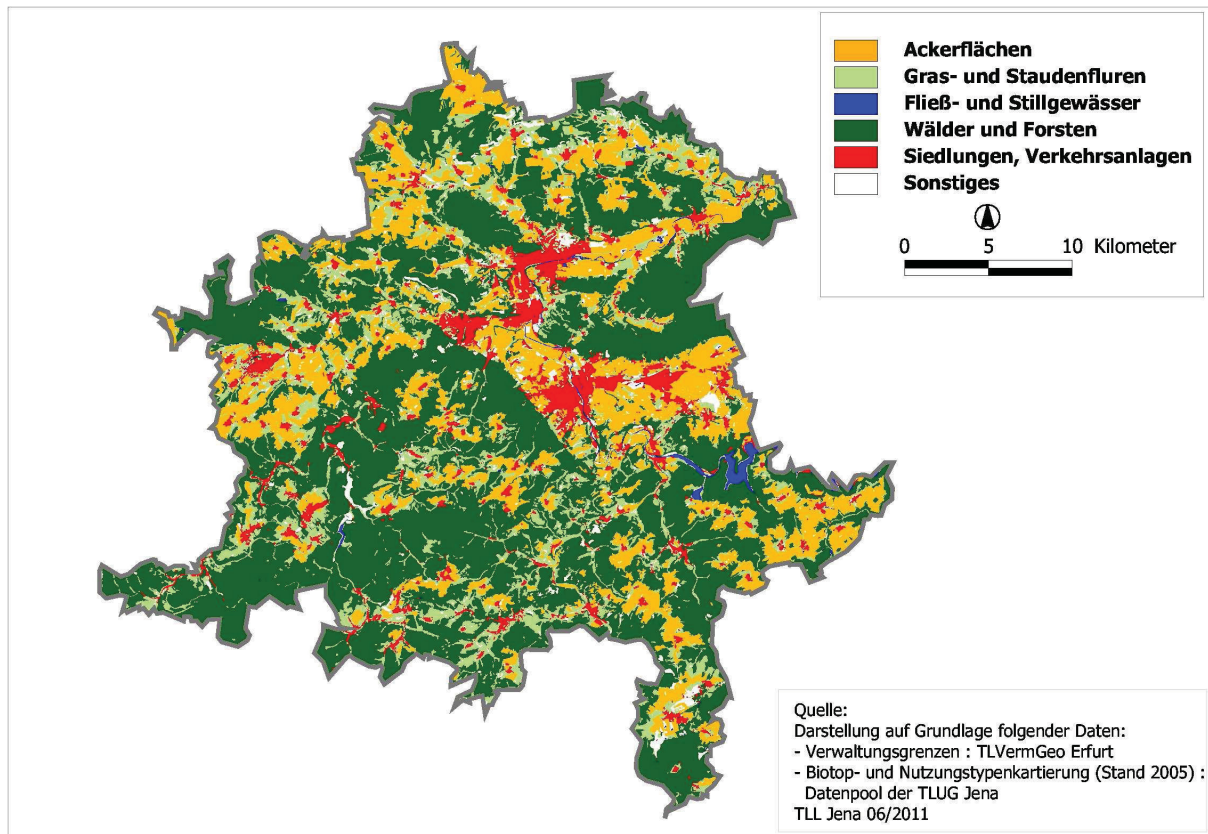


Abbildung 7: Flächennutzung im Landkreis Saalfeld-Rudolstadt

Insgesamt sind 44 % der landwirtschaftlichen Fläche (14 775 ha) Dauergrünland. Der Anteil der Wiesen und Weiden nimmt mit der Höhenlage und Hangneigung zu.

Als Ackerland werden 18 758 ha bzw. 56 % der landwirtschaftlichen Fläche genutzt wobei sich die Ackerbaustandorte überwiegend im Norden und Osten des Landkreises befinden.

Wie im LK HVL wird auch im LK SLF überwiegend Getreide angebaut, allerdings hier in erster Linie Weizen und Gerste. Ackerfutter (inkl. Silomais) und Ölfrüchte (hauptsächlich Raps) nehmen ebenfalls einen beträchtlichen Anteil ein. Die Viehhaltung folgt der Verteilung der ackerbaulichen Standorte und befindet sich überwiegend im Norden und Osten des Landkreises.

Fünf landwirtschaftliche Biogasanlagen, mit einer Leistung zwischen 265 und 600 kW_{el}, leisten einen Beitrag zur Bioenergieerzeugung (**Abbildung 8**).

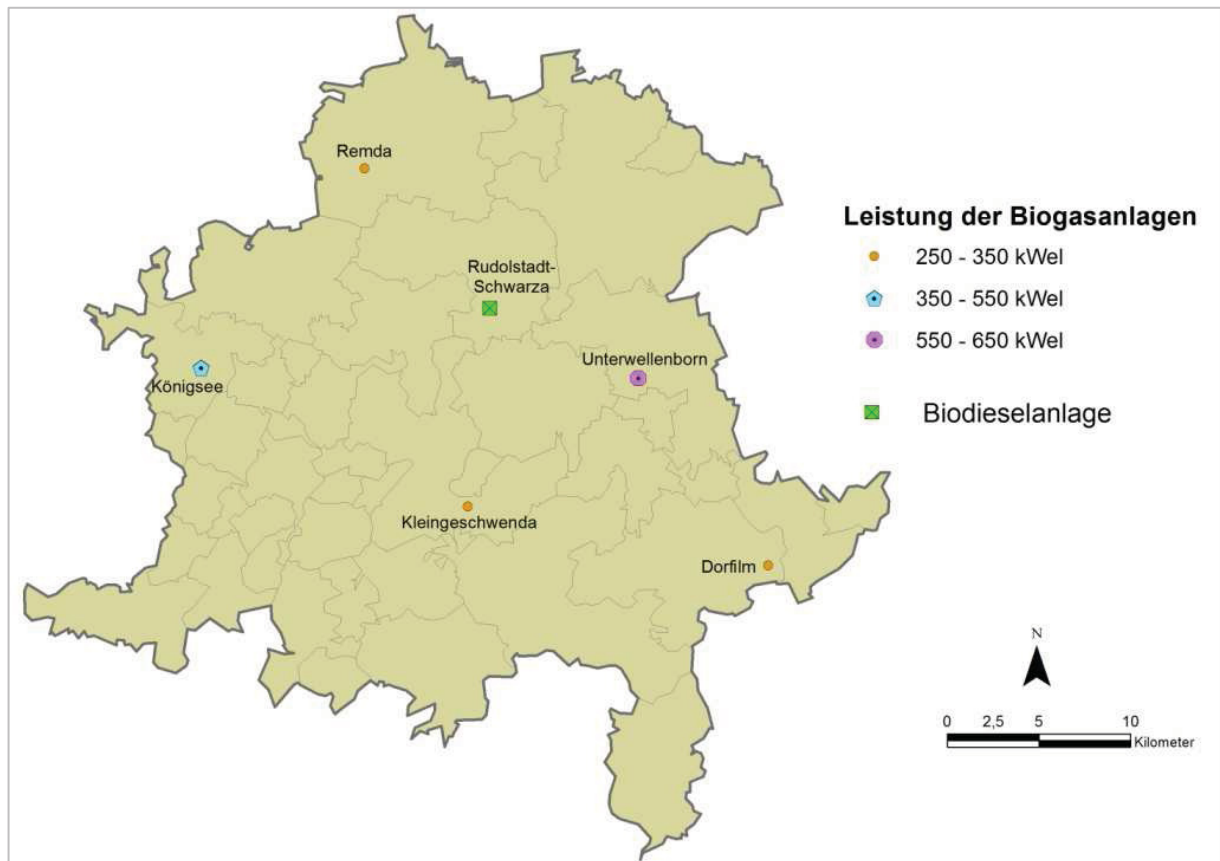


Abbildung 8: Bioenergieanlagen im Landkreis Saalfeld-Rudolstadt (Stand 2011)

Zur Biogaserzeugung werden hauptsächlich Wirtschaftsdünger eingesetzt (zu ca. 80 %). Weitere Rohstoffe sind Mais-, Anwelk- und Getreideganzpflanzensilage sowie Getreidekorn und Zuckerrüben (REINHOLD, 2011).

3.2.5.2 Ermittlung des Biomassepotenzials vom Dauergrünland

Die Ermittlung des Grünlandpotenzials erfolgte durch das Verschneiden von Bodenkarten, Maßstab 1:300 000 (BÜK 300) für den LK HVL bzw. Biotoptypen- und Nutzungstypenkarten für den LK SLF mit InVeKoS-Daten unter zu Hilfenahme einer GIS-Software und der anschließenden Zuordnung der entsprechenden Grünlanderträge zu den Feldblöcken, die in TH nur anonymisiert auf Gemeindeebene vorlagen (Tabelle 12 und Tabelle 13). Die Betrachtungsebene für die Potenzialrechnung ist die Gemeinde.

Die Zuordnung der Erträge für die Grünlandfeldblöcke des LK HVL erfolgte, wie in Tabelle 12 zusammengestellt, auf Grundlage der Ergebnisse aus langjährigen Untersuchungen des Landesamtes für Ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurneuordnung (FECHNER ET AL., 2011; HERTWIG UND PRIEBE, 2009; PRIEBE, 2011).

Die in Tabelle 12 aufgeführten Werte sind als durchschnittliche, jährliche Erträge zu verstehen. Sie geben das natürliche Ertragspotenzial der Grünlandstandorte wieder. Verluste entstehen durch Ernte und Lagerung der Aufwüchse sowie auch beim Weiden der Tiere. Die Höhe dieser Verluste beläuft sich insgesamt auf 30 % bei Heu und 20 % bei Silage. Die Weideverluste durch Trittschäden der Tiere betragen ebenfalls 20 %.

Tabelle 12: Jährliche Erträge extensiver und intensiver Grünlandflächen im Havelland

Kategorie	Ertrag, ext. t TM ha ⁻¹	Ertrag, int. t TM ha ⁻¹	Standorte/ Böden
I	5,0	9,5	Böden aus Lehm/Schluff/Ton über (Auen)Sand Niedermoore aus Torf verbreitet über Lehm und Mudde
II	4,0	8,5	Sandböden mit Torfböden in holozänen Tälern Niedermoore aus Torf und aus Torf über Flusssand
III	3,5	7,5	Sandböden in pleistozänen und holozänen Tälern (Lehm)Sandböden über Lehm mit Sandböden Böden aus geringmächtigem Torf mit mineralischen Böden
IV	2,5	5,0	podsolige Braunerden und podsolige Gley-Braunerden Sandböden mit Sandböden über Lehm Sandböden in pleistozänen Tälern mit Flugsandböden

Im LK SLF bilden langjährige Untersuchungen der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft auf entsprechenden Standorten die Grundlage der verwendeten Nettoerträge (siehe Tabelle 13) Gleichzeitig erfolgte eine Schätzung des Anteils der Gebrauchswerte Heu bzw. Silage.

Tabelle 13: Jährliche Nettoerträge verschiedener Vegetationstypen in Saalfeld-Rudolstadt (HOCHBERG, 2011)

Kategorie	Grünlandtyp	Ertrag Heu ^{a)} t TM ha ⁻¹	Ertrag Silage ^{b)} t TM ha ⁻¹	Anteil Heu ^{a)}	Anteil Silage ^{b)}
I	Goldhafer-(Berg)wiese	4,5	5,8	25 %	75 %
II	Fuchschwanz-(Auen)wiese	4,5	7,0	20 %	80 %
III	Weidelgras-Weißklee-Weide	6,5	7,8	5 %	95 %
IV	Kohldistelfeuchtwiese	5,0	7,5	95 %	5 %
V	Glatthaferwiese (Sand-/Zechstein)	3,0	4,5	35 %	65 %
		3,0	4,5	35 %	65 %
VI	typische Tal-Glatthaferwiese (Muschelkalk)	4,2	6,0	25 %	75 %
VII	Sonstiges produktives Grünland	5,6	7,2	18 %	82 %

^{a)} Heu aus Biotoppflege ^{b)} Silage mit optimaler Qualität

Die landwirtschaftlichen Grünlandflächen aus den InVeKoS-Daten stimmen jedoch nicht immer mit den Polygonen der Biotoptypen- und Nutzungstypenkartierungen flächendeckend überein. Ein gewichteter Mittelwert aus den Erträgen und Flächen einzelner Biotop- und Nutzungstypen wurde gebildet und als Kategorie Nr. VII in die Tabelle 13 eingefügt. In diese Kategorie fallen alle Grünlandflächen, die außerhalb der Biotop-/Nutzungstypenpolygone liegen. Die genannten Erträge verstehen sich frei Lager/Silo.

3.2.5.3 Ermittlung des Grünlandbedarfes

Um das zur energetischen Nutzung zur Verfügung stehende Grünlandpotenzial zu ermitteln, wurde der Futterbedarf und Rohstoffbedarf bereits existierender Bioenergieanlagen berücksichtigt. Die unterstellten Tierbestände auf Gemeindeebene sind den InVeKoS- und HIT-Daten entnommen und die angenommenen Grundfutterrationen (Tabelle 14) wurden mit Experten abgestimmt. Für den LK SLF wurden standortbedingte Änderungen gegenüber dem LK HVL vorgenommen.

Tabelle 14: Angenommene Grundfutterrationen in kg TM Tier⁻¹ d⁻¹

Tiergruppe	Mais-silage	Gras-silage	Weide	Heu
Kälber unter 6 Monaten	0,5	0,5	-	0,5
Männliche Rinder von 6 Monaten bis 2 Jahren	5,4	1,0	-	-
Männliche Rinder über 2 Jahre	7,0	1,5	-	-
Weibliche Mastrinder von 6 Monaten bis 2 Jahren	2,0	4,7	-	-
Weibliche Zuchtrinder von 6 Monaten bis 2 Jahren	1,7 ^{a)}	3,0 ^{a)}	1,0	1,0
Weibliche Rinder über 2 Jahre	1,2	4,3	2,0	0,9
Milchkühe	7,0 ^{b)}	4,8 ^{b)}	-	0,9
Mutterkühe	-	- ^{c)}	6,0	6,0 ^{c)}
Mutterschafe	-	-	0,9	0,9
Schafe älter als 1 Jahr (außer Mutterschafe)	-	-	0,6	0,6
Ziegen	-	-	1,0	1,0
Equiden unter 6 Monaten	-	-	-	1,3
Equiden über 6 Monaten	-	-	3,0	3,0

Die für Saalfeld-Rudolstadt vorgenommenen Änderungen: ^{a)} Maissilage 1,0 und Grassilage 3,7
^{b)} Maissilage 6,0 und Grassilage 5,8 ^{c)} Grassilage 4,2 und Heu 1,8

3.2.5.4 Szenarien zur Energiegewinnung aus Biomasse vom Grünland

Bei der Wahl der Szenarien für die Verbrennung von Biomasse werden die alleinige thermische Nutzung und die kombinierte Wärme- und Stromerzeugung unterschieden. Um die Bewertungsgrundlage und Vergleichbarkeit der energetischen Verwertungspfade von Gras zu erweitern, wird die Vergärung von Biomasse zu Biogas ebenfalls in Betracht gezogen. Bei der Verbrennung erscheint es sinnvoll, zwischen zwei Szenarien der Energiebereitstellung zu unterscheiden: einem dezentralen und einem zentralen Szenario.

Dezentrale Verbrennung zur alleinigen thermischen Nutzung

Das dezentrale Szenario sieht die Nutzung von Grünlandaufwüchsen in kleinen bis mittelgroßen Feuerungsanlagen, d.h. Biomassekessel der Klasse „Kleine Heizwerke“ mit einer durchschnittlichen Leistung um 300 kW, in Form einer halmguttauglichen Holzfeuerungsanlage vor.

Sämtliche Kalkulationen für die dezentrale Verbrennung werden auf Gemeindeebene durchgeführt. Als Ausgangspunkt dienen die geschätzten Biomasseüberschüsse des Grünlandes.

Um den Wärmebedarf der Gemeinden zu ermitteln, wird auf statistische Daten zurückgegriffen. Für die untersuchten Landkreise sind Wohnungsbestand und -struktur (STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND, 2011) sowie Einwohnerzahlen der Gemeinden (STATISTISCHES LANDESAMT BRANDENBURG, 2010; STATISTISCHES LANDESAMT THÜRINGEN, 2010) statistischen Unterlagen entnommen. Bei Raumwärme- und Warmwasserbedarf wurde mit den in Tabelle 15 zusammengestellten Werten gerechnet. In allen Szenarien werden ausschließlich der Raumwärmebedarf der Wohnhäuser sowie der private Warmwasserbedarf der Bevölkerung einbezogen. Industrie-, gewerbliche und öffentliche Gebäude werden nicht berücksichtigt.

Tabelle 15: Charakteristika der Wohnhäuser und des Wärmebedarfs

Landkreis	Havelland			Saalfeld-Rudolstadt		
Wohnhauskategorie	EFH	ZFH	MFH	EFH	ZFH	MFH
Zahl der Wohnungen pro Wohnhaus	1	2	6,4	1	2	5,9
Wohnfläche pro Haus, m ²	104	156	378	106	149	354
Wohnhäuseranteil (dezentrale Verbrennung)	76 %	12 %	12 %	56 %	26 %	18 %
Wohnhäuseranteil (zentrale Verbrennung)	15 %	10 %	75 %	15 %	10 %	75 %
Belegung, Personen pro Wohnung	2,5	2,1	1,9	2,5	2,1	1,9
Raumwärmebedarf, kWh m ⁻² a ⁻¹	150					
Warmwasserbedarf, kWh Person ⁻¹ a ⁻¹	630 (JUNGBLUTH, 2006)					

EFH - Einfamilienhäuser, ZFH - Zweifamilienhäuser, MFH - Mehrfamilienhäuser

Zentrale Verbrennung zur kombinierten Wärme- und Stromerzeugung

Die zentrale Verbrennung sieht die Verwertung großer Biomasse-mengen vor und muss daher in der Nähe von Standorten mit entsprechend hohem Energiebedarf stattfinden. Bei dieser Biomassenutzung bietet sich die Energiegewinnung durch Kraft-Wärme-Kopplung an. Die Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen wird zudem durch Vergütungen des EEG gestärkt. Bei der Wahl der Standorte für zentrale Biomasse-Heizkraftwerke ist es ebenfalls wichtig, dass aus den angrenzenden Gemeinden ausreichend Biomasse vom Dauergrünland bereitgestellt werden kann. Die Nutzung von Heu und Holz wird zu gleichen Anteilen angenommen. Der Wohnungsbestand an Mehrfamilienhäusern wird auf 75 % geschätzt. Der Rest verteilt sich auf Ein- und Zweifamilienhäuser (Tabelle 15).

Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen wurden für beide Verbrennungsszenarien anhand der Annahmen aus Tabelle 16 durchgeführt. Die Bereitstellungskosten von Heu wurden für jede Modellregion anhand standorttypischer Herstellungskosten und Erträge sowie gewährter Flächenbeihilfen⁴ berechnet. Die Kosten der Holzhackschnitzel wurden mit 110 € t⁻¹ TM frei Anlage veranschlagt.

⁴ Die Grünlandbeihilfen wurden nach InVeKoS-Angaben 2010 kalkuliert. Sie bestehen aus Betriebsprämien und den Prämien verschiedener Förderprogramme. Das gewichtete Subventionsniveau betrug für das Havelland 382 € ha⁻¹ und für Saalfeld-Rudolstadt 702 € ha⁻¹.

Tabelle 16: Annahmen für die Wirtschaftlichkeitskalkulation der Biomasseverbrennung

Parameter	dezentrale Verbrennung	zentrale Verbrennung
Anlagentyp	Heizwerk	Heiz-Kraftwerk
Volllaststunden	3 000 h a ⁻¹	5 500 h a ⁻¹
Wirkungsgrad	85% (Biomassekessel)	30 % elektrisch 50 % thermisch
Spezifische Investitionskosten: Anlagen	850 € kW _{th} ^{-1 a)} 900 € kW _{th} ^{-1 b)}	5.000 € kW _{el} ⁻¹
Wärmenetz	150 € m ⁻¹	300 € m ⁻¹
Wärmeverteilung ^{c)}	3 000 € Stück ⁻¹	3 000 € Stück ⁻¹
Tilgungszuschuss durch MAP (BMU, 2011): Anlagen Wärmenetz Wärmeverteilung	20-50 € kW ^{-1 d)} 60 € m ⁻¹ 1 800 € Stück ⁻¹	
Entfernung (Wärmenetzlänge): vom Heiz(kraft)werk zum 1.Haus zu jedem weiteren Haus	150 m 25 m	1.000 m 15 m
Wärmenetzverluste	19 % ^{e)}	
Zinssatz bei Investitionen	5 %	
Nutzungsdauer: Bauteile, Wärmenetz, Übergabestation alles andere	30 Jahre 15 Jahre	
Anteil der Bautechnik-Kosten	25 % der Gesamtkosten der Anlage	
Reparaturen/Wartung: Bauteile, Technik Wärmenetz	1,5 % 1,0 %	
Betriebsmittel, Ascheentsorgung	1 %	
Versicherung, Sonstiges	2 %	
Arbeitszeitbedarf/Personalbedarf Arbeitslohn	116-257 h kW _{th} ^{-1 a)} 20 € h ⁻¹	4-14 Mannjahre ^{g)} 40 000 € Mannjahr ⁻¹
Eigenstromverbrauch Stromkosten	- -	2 % 0,17 € kWh ⁻¹
Heukosten, frei Anlage (inkl. Flächen- prämien)	46 € t TM ⁻¹ (HVL) 96 € t TM ⁻¹ (SLF)	60 € t TM ⁻¹ (HVL) 110 € t TM ⁻¹ (SLF)
Holzhackschnitzelkosten, frei Anlage	110 €/t TM	
Heizwert: Heu Holz	4,7 kWh kg TM ⁻¹ 5,1 kWh kg TM ⁻¹	
Wärmeverkaufspreis	0,06 € kWh _{th} ⁻¹	

^{a)} bei Biomassekesseln über 200 kW_{th} ^{b)} bei Biomassekesseln unter 200 kW_{th} ^{c)} Hausübergabestation
^{d)} der Tilgungszuschuss für Heizwerke wird hier einheitlich mit 20 € kW_{th}⁻¹ veranschlagt
^{e)} einheitlicher Wert für zentrale und dezentrale Verbrennung, hohe Verluste sind bei kleineren Heizwerken auf geringe Wärmeabgabe pro m Wärmenetz und bei großen Heiz-Kraftwerken auf lange Wärmetrassen zurückzuführen ^{f)} ermittelt nach der Formel von C.A.R.M.E.N. (KRAPF, 2005): spezifischer Arbeitszeitbedarf = 20,257*Leistung des Biomassekessels^{0,5592} ^{g)} geschätzte Richtwerte zur technischen Betriebsführung von Biomasse-Heizkraftwerken mit einer FWL zwischen 4 MW (4 Mannjahre) und 20 MW (14 Mannjahre)

Dezentrale Biogasgewinnung zur kombinierten Wärme- und Stromerzeugung

Als Alternative zur Verbrennung wird die Biomethanisierung von Grünlandaufwüchsen untersucht. In diesem Verfahren werden die Grünlandaufwüchse nicht getrocknet, sondern angelüftet und in Form von Silage konserviert. Als Kosubstrate bei der Fermentation von Grünlandbiomasse werden lediglich Tierexkremente in Betracht gezogen. Die in den viehhaltenden Betrieben anfallenden Wirtschaftsdünger werden üblicherweise auf den betriebseigenen Feldern ausgebracht. Zur Berechnung der Anlagengrößen wurde zusätzlich zu den potenziellen Grünlandmengen der Anfall an Wirtschaftsdüngern ermittelt. In Betracht kommen hierfür Rinder- und Schweinebestände, deren Tierzahlen aus den InVeKoS- und HIT-Daten aus den einzelnen Gemeinden stammen. Die Exkrementmengen aus der Schaf-, Ziegen-, Geflügel- und Pferdehaltung wurden nicht berücksichtigt. Die Menge der anfallenden Wirtschaftsdünger wurde nach (JÄKEL ET AL., 2003) kalkuliert. Eine Unterteilung der Tiere bezüglich der Haltungsform (Stall oder Weide bzw. Stall und Weide) und Aufstallung (Gülle/Stallmist) konnte aufgrund der Experteneinschätzungen (ROFFEIS, 2011; ZIMMER, 2011), Betriebsbefragungen (HOCHBERG UND ZOPF, 2011) und Literaturangaben (ANACKER, 2009A; ANACKER, 2009B) für jede Modellregion vorgenommen werden. Anhand der in Tabelle 17 genannten Substrateigenschaften wurde die Leistung potenzieller Biogasanlagen für jede Gemeinde berechnet. Es wurde festgelegt, dass eine Größe von mindestens 150 kW_{el} erreicht werden muss, um diese in die weitere ökonomische Betrachtung einzubeziehen.

Tabelle 17: Richtwerte für die Berechnung von Biogasanlagengrößen

Substrat	TM %	oTM %	Methanausbeute ^{a)} m ³ t oTM ⁻¹
Grassilage	35	89	250
Rindergülle	10	80	209
Rindermist	25	85	248
Schweinegülle	6	80	252

^{a)} die Methanausbeute steigt bei einer mechanischen Aufbereitung der Substrate um 15 % (PLÖCHL, 2011)

Die Zusammensetzung der eingesetzten Substrate hat einen direkten Einfluss auf die Konstruktion und die Betriebsweise der Anlage. In Absprache mit einem Bioenergiefachmann (PLÖCHL, 2011) wurden vier Verfahren der Biogaserzeugung ausgearbeitet und, mittels der in Tabelle 18 zusammengestellten Kenndaten, die Wirtschaftlichkeit berechnet:

- Nassfermentation mit einem Gülle-Anteil von mindestens 50 % der gesamten Substratmischung bezüglich der Frischmasse.
- Nassfermentation mit Enzym-Einsatz für eine überwiegende Güllevergärung mit einem Grasanteil von unter 10 % des Substratinputs
- Nassfermentation mit mechanischer Aufbereitung (Hammermühle) bei einem Grasanteil von über 50 % (auch ohne Einsatz von Gülle).
- Feststofffermentation im Garagenverfahren (Grasanteil unter 50 % des Substratinputs). Die spezifischen Investitionskosten beziehen sich auf das Garagenvolumen, welches anhand folgender Annahmen kalkuliert wurde: eine einmonatige Verweilzeit des Substratgemisches in der Garage bei 50 %-iger Rückführung des vergorenen Materials in die Garage und einer Schüttdichte der Substratmischung aus Gras und Festmist von 0,7 t m⁻³ (LLH-HESSEN, 2011).

Tabelle 18: Kenndaten für die Wirtschaftlichkeitskalkulation der Biogaserzeugung

Parameter	Annahmen
Volllaststunden des BHKW	8 000 h a ⁻¹
Betriebsreserve des BHKW	10 %
Ausfall der Gasproduktion, Prozessstörungen	5 % ^{a)}
Wirkungsgrad des BHKW (elektrisch; thermisch)	41,0 %; 42,5 % ^{b)} 39,5 %; 41,0 % ^{c)}
Spezifische Investitionskosten: Nassfermentation Nassfermentation mit Enzymen Mechanische Aufbereitung Feststofffermentation (in Garagen)	4 400 € kW _{el} ⁻¹ 4 000 € kW _{el} ⁻¹ bzw. 4 800 € kW _{el} ⁻¹ ^{d)} 5.500 € kW _{el} ⁻¹ 900 € m ⁻³
Enzymkosten (abhängig vom Graseinsatz):	4 000-8 000 € a ⁻¹ ^{e)}
Zinssatz	5 %
Nutzungsdauer	15 Jahre
Reparatur und Wartung ^{f)} : Bauteile Technik, inkl. BHKW	1 % 4 %
Versicherung, Sonstiges (inkl. Laboranalysen)	2 %
Arbeitslohn ^{g)}	20 € h ⁻¹
Eigenenergiebedarf: Menge (bezogen auf die erzeugte Strommenge) Preis	9 % bzw. 3 % ^{h)} 0,17 € kWh ⁻¹
Zündöl: Verbrauch (bezogen auf die Bruttoenergie) Preis	10 % 0,90 € l ⁻¹
Grassilagekosten, frei Anlage (inkl. Flächenprämien)	4,5 € t ⁻¹ FM (HVL) 21,5 € t ⁻¹ FM (SLF)
Wirtschaftsdüngerkosten, frei Anlage ⁱ⁾ : Rindergülle, Schweinegülle Rindermist	4,5 € t ⁻¹ 10,0 € t ⁻¹
Anteil der Wärmenutzung	25 %
Wärmeverkaufspreis	0,03 € kWh _{th} ⁻¹
Gärrestausrückführung (nur für Gras) ⁱ⁾	3 € t ⁻¹

^{a)} bezogen auf jährliche Gasproduktion ^{b)} Zündstrahlmotoren und Gas-Otto-Motoren über 500 kW_{el}

^{c)} Gas-Otto-Motoren zwischen 300 - 500 kW_{el} ^{d)} entsprechend für Biogasanlagen über 600 kW_{el} und unter 200 kW_{el} ^{e)} auf t FM Gras bezogene Enzymkosten betragen 2,50 € t⁻¹ bei ca. 10 t FM d⁻¹ Graseinsatz und 4,00 € t⁻¹ bei ca. 5 t FM d⁻¹ Graseinsatz ^{f)} bezogen auf gesamtes Investitionsvolumen, Anteile Bau:Technik = 55:45 (Nass- und Feststofffermentation) und 50:50 (mechanische Aufbereitung)

^{g)} Arbeitszeitbedarf nach (FNR, 2010) ^{h)} 9 % bei Nass- und 3 % bei Feststofffermentation. Der erhöhte Eigenstrombedarf der Anlagen mit einer mechanischen Substrataufbereitung wird durch die Stromersparnisse aus reduziertem Rühren und Pumpen kompensiert. ⁱ⁾ Wirtschaftsdünger sind an sich kostenneutral, da alle Kosten dem Betriebszweig Tierhaltung zugeschrieben werden; Aufwand entsteht infolge des zusätzlichen Transportes zur Biogasanlage und der Ein-/Ausbringung aus dem Fermenter.

Es wird eine Wärmeabnahme von 25% angenommen (zusätzlich zum Eigenwärmebedarf der Anlage).

Generelle Annahmen

- Für alle in den Szenarien modellierten Bioenergieanlagen wurde 2011 als Jahr der Inbetriebnahme unterstellt.
- Alle konzipierten Bioenergieanlagen erzielen ihre Erlöse durch den Wärmeverkauf.
- Zusätzliche Einnahmen erhalten stromproduzierende Anlagen (Biomasse-Heizkraftwerke, Biogasanlagen) durch das Vergütungssystem des EEG (2009). Die für die betrachteten Anlagen (Inbetriebnahme vor dem 01.01.2012) relevanten Fördersätze des EEG sind in Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19: Ausgewählte Vergütungssätze nach EEG 2009 [ct kWh⁻¹], Inbetriebnahmejahr 2011

Art der Vergütung	bis 150 kW _{el}	bis 500 kW _{el}	bis 5 MW _{el}	bis 20 MW _{el}
Grundvergütung	11,44	9,00	8,09	7,63
NawaRo-Bonus (Verbrennung)	5,88	5,88	2,45	-
NawaRo-Bonus (Strom aus Biogas):	6,86	6,86	3,92	-
+ Gülle-Bonus	3,92	0,98	-	-
+ Landschaftspflege-Bonus	1,96	1,96	-	-
KWK-Bonus (einheitlich)	2,94	2,94	2,94	2,94

- Alle Kalkulations- und Preisangaben beinhalten nicht die gesetzliche Mehrwertsteuer.

4 Ergebnisse

4.1 Trockenmasseerträge

Im Laufe der Versuchsjahre zeigten sich deutliche Unterschiede im Biomassepotenzial der verschiedenen Dauergrünlandtypen aber auch der Nutzungsvarianten am jeweiligen Standort (Abbildung 9).

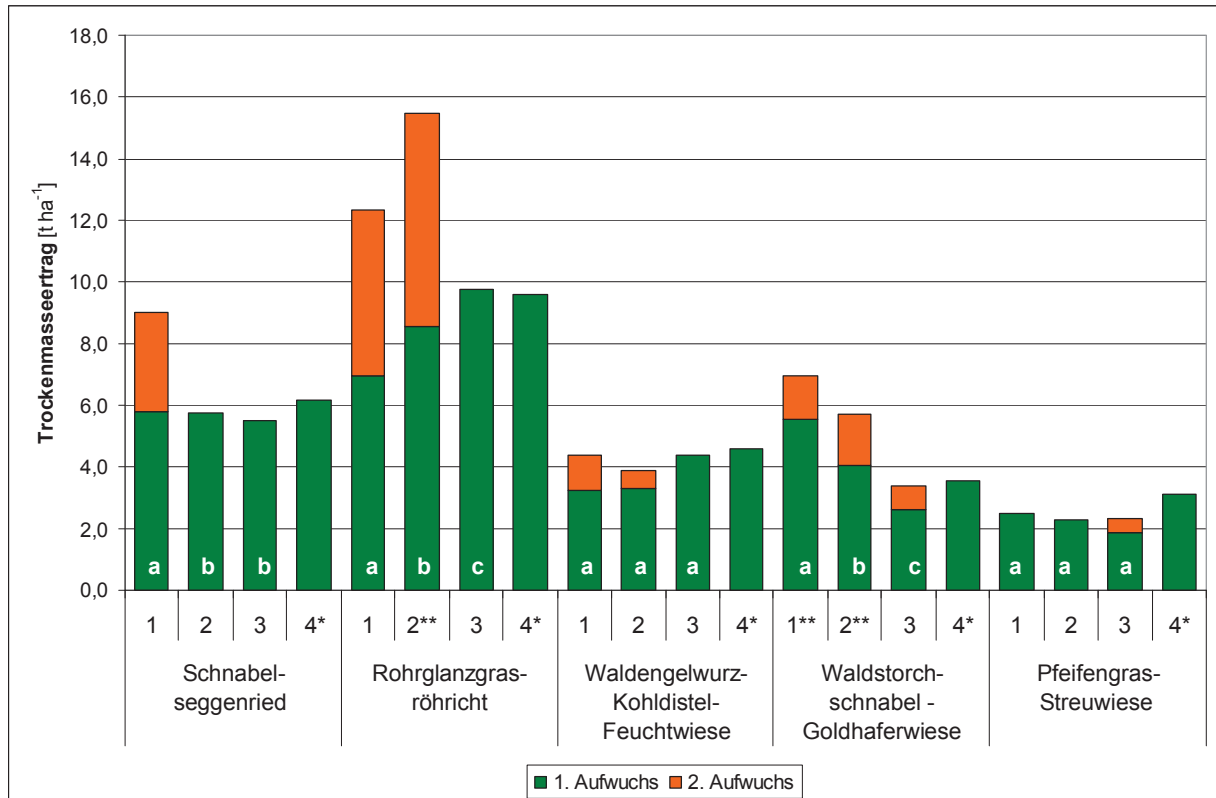


Abbildung 9: Trockenmasseerträge [t ha^{-1}] im Mittel der drei Versuchsjahre (2008-2010) sowie der verschiedenen Pflanzengesellschaften und Nutzungsvarianten, wobei * Beerntung alle zwei Jahre ** gedüngte Nutzungsvarianten, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bei $p \leq 0,05$

Die ertragreichste Pflanzengesellschaft war das Rohrglanzgrasröhricht mit TM-Erträgen von $9,62 \text{ t ha}^{-1}$ bis $15,48 \text{ t ha}^{-1}$.

Die TM-Erträge des Schnabelseggenrieds lagen im Bereich von $5,50 \text{ t ha}^{-1}$ bis $9,03 \text{ t ha}^{-1}$ und damit deutlich unter denen des Rohrglanzgrasröhrichts.

Die ertragärmste Pflanzengesellschaft war die Pfeifengras-Streuwiese mit TM-Erträgen zwischen $2,29 \text{ t ha}^{-1}$ und $3,65 \text{ t ha}^{-1}$.

Die TM-Erträge der Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese und die Erträge der ungedüngten Nutzungsvarianten der Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese lagen auf vergleichbarem Niveau von etwa $4,0 \text{ t ha}^{-1}$.

Auf den produktiven Standorten (Niedermoor und Flussmarsch) war eine deutliche Ertragswirkung der Schnitthäufigkeit zu verzeichnen, bei der es zu signifikanten Mehrerträgen bei der zwei- gegenüber der einschnittigen Nutzung kam.

Bei der Waldengelwurz-Kohldistelwiese-Feuchtwiese und der Pfeifengras-Streuwiese hat die jährlich zweimalige Mahd gegenüber der jährlich einmaligen Mahd keine gesicherten Mehrerträge gebracht.

Bei der, auf geregelte Nährstoffzufuhr für ihre Erhaltung angewiesene, Waldstorcheschnabel-Goldhaferwiese sind signifikante Ertragswirkungen zwischen den drei Düngungsvarianten (1, 2, 3) festgestellt worden.

Auf dem Niedermoorstandort (Rohrglanzgrasröhricht) führte die Kaliumdüngung (Nutzungsvariante 2) zu einem gesicherten Mehrertrag von 3,13 t TM ha⁻¹.

Zwischen den Nutzungsvarianten die jährlich bzw. alle zwei Jahre einmal im Herbst gemäht wurden gab es keine nennenswerten Ertragsunterschiede.

Identifizierte Nutzungsvarianten der untersuchten Pflanzengesellschaften, bei denen das Ertragspotenzial ausgeschöpft bzw. das Ertragsoptimum erreicht wird, sind:

- Schnabelseggenried
 - Nutzungsvariante 1: zweimalige Mahd
 - Nutzungsvariante 4: Mahd alle 2 Jahre, Alternativvariante bzgl. relativ hohem Ertrag im Vergleich zu den anderen Pflanzengesellschaften, bei nur geringem Aufwand
- Rohrglanzgrasröhricht
 - Nutzungsvariante 2: zweimalige Mahd und K-Zufuhr, K-Düngung begegnet der Aushagerung
- Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese
 - Nutzungsvariante 3: jährliche Mahd im Sommer
- Waldstorcheschnabel-Goldhaferwiese
 - Nutzungsvariante 2: zweimalige Mahd mit PK-Düngung
- Pfeifengras-Streuwiese
 - Nutzungsvariante 2: jährlich einmaliger Schnitt im Spätsommer/Herbst

4.2 Futterqualität

Für die Bestimmung und Bewertung der Futterqualität wurden die Inhaltsstoffe Rohfaser, Rohprotein, die Verdaulichkeit in Form von ELOS und die Energiekonzentration in Form von umsetzbarer Energie (ME) und Netto-Energie-Laktation (NEL) herangezogen.

Die Gehalte der Inhaltsstoffe Rohfaser, Rohprotein sowie die Verdaulichkeit und die Energiekonzentrationen der Nutzungsvarianten, die das Ertragspotenzial ausschöpfen bzw. das Ertragsoptimum erreichen, sind in Tabelle 20 aufgelistet.

Es wird an dieser Stelle nur auf die in Kapitel 4.1 erarbeiteten, ertragreichsten Varianten eingegangen, da die geernteten Futtermengen aller anderen Varianten nicht praxisrelevant wären.

Tabelle 20: Futterwert der Aufwüchse nach Dauergrünlandtyp, Variante und Aufwuchs (n = 3 pro Variante und Aufwuchs)

Dauergrünlandtyp	Nutzungs- variante	Aufwuchs	Roh- faser	Roh- protein	ELOS	Energie	
			% TM	% TM	% TM	ME	NEL
						MJ kg ⁻¹ TM	MJ kg ⁻¹ TM
Schnabel- seggenried	1	1	30,4	9,7	40,3	7,4	4,5
	1	2	27,2	10,8	37,9	7,1	4,4
	4**	1	30,5	8,2	30,0	6,0	3,7
Rohrglanzgras- röhricht	2	1	34,9	7,9	38,2	7,0	4,3
	2	2	31,1	10,9	37,8	7,2	4,6
Waldengelwurz- Kohldistel- Feuchtwiese	3	1	30,3	12,7	43,3	7,6	4,7
Waldstorchschnabel- Goldhaferwiese*	2	1	28,0	9,8	56,6	9,1	5,6
	2	2	21,1	14,6	67,4	10,2	6,2
Pfeifengras- Streuwiese	2	1	27,6	8,6	41,1	7,5	4,6

* Rohfaser und Rohprotein n=3, ELOS, MJ NEL und MJ ME n=2

** Variante 4 n=1

Die Rohfaser- bzw. Rohproteingehalte in den Aufwüchsen schwankten zwischen 21,1 % TM und 34,9 % TM bzw. 7,9 % TM und 14,6 % TM in Abhängigkeit von Pflanzengesellschaft, Nutzungsvariante und Aufwuchs, wobei das Rohrglanzgrasröhricht in Variante 2, 1. Aufwuchs, den höchsten Rohfasergehalt sowie den niedrigsten Rohproteingehalt und die Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese in Variante 2, 2. Aufwuchs, den niedrigsten Rohfasergehalt aber den höchsten Rohproteingehalt erzielte. Die Verdaulichkeit erreichte Werte zwischen 30,0 % TM (Schnabelseggenried, Variante 4) und 67,4 % TM (Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese in Variante 2, 2. Aufwuchs) mit deutlicher Abhängigkeit von der Pflanzengesellschaft. Die Energiekonzentrationen lagen zwischen 6,0 und 10,2 MJ ME kg⁻¹ TM bzw. zwischen 3,7 und 6,2 MJ NEL kg⁻¹ TM in Abhängigkeit von Pflanzengesellschaft und Nutzungsvariante analog zur Verdaulichkeit.

Im Vergleich mit Mindestanforderungen, Richtwerten bzw. Ansprüchen an den Futterwert von Grundfutter bzw. Grünland (vgl. Tabelle 2 bzw. Tabelle 3) ist ersichtlich, dass mit Ausnahme der Aufwüchse der zweischnittigen PK-gedüngten Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese, alle anderen, das Ertragspotenzial ausschöpfenden bzw. das Ertragoptimum erreichenden Nutzungsvarianten, teilweise deutlich höhere Rohfaser- und teilweise deutlich niedrigere Rohproteingehalte hatten, bei deutlich niedrigeren Energiekonzentrationen sowohl im Bezug auf umsetzbarere Energie wie auch auf Nettoenergie Laktation, also zu Futterzwecken nur sehr eingeschränkt verwendbar sind.

4.3 Qualität der Biomasse - Verbrennungseignung

Für die Bestimmung der Verbrennungseignung wurden die Inhaltsstoffe Rohfaser, Lignin (in Form von säurelöslichem Lignin - ADL) und Rohasche sowie die Elemente Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Kalium, Kalzium, Magnesium, Stickstoff, Schwefel, Chlor, Arsen, Cadmium, Blei, Chrom, Thallium, Quecksilber und Zink herangezogen. Die Gehalte, der aus Verbrennungssicht interessanten Inhaltsstoffe und Elemente werden nachfolgend mit den entsprechenden Gehalten im Getreidestroh verglichen.

Wo bekannt, werden zudem noch Richtwerte für Heu als Vergleichsgröße einzelner Inhaltsstoffgehalte herangezogen.

Heizwert und Elementargehalte von C, H, O

Die Heizwerte und die Kohlenstoff-, Wasserstoff-, Sauerstoffgehalte der Aufwüchse sind in Tabelle 21 dargestellt.

Die Heizwerte unterschieden sich zwischen den Nutzungsvarianten und Aufwüchsen bei allen untersuchten Pflanzengesellschaften nur tendenziell und lagen überwiegend unter dem von Stroh.

Bei den Nutzungsvarianten mit höchstem bzw. optimalem Ertrag schwankten sie zwischen 16,2 MJ kg TM (Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese) und 17,2 MJ kg TM (Schnabelseggenried).

Die niedrigsten Heizwerte wurden tendenziell bei der Nutzungsvariante mit Mahd alle zwei Jahre gemessen.

Die Aufwüchse des Schnabelseggenrieds und der Pfeifengras-Streuwiese wiesen tendenziell die höchsten Kohlenstoffgehalte auf, während bei den Aufwüchsen der Storchschnabel-Goldhaferwiese, der Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese und des Rohrglanzgrasröhrichts geringfügig niedrigere Werte ermittelt wurden. Zwischen den Nutzungsvarianten bestanden ebenfalls nur tendenzielle Unterschiede.

Die Aufwüchse mit den höchsten Kohlenstoffgehalten lagen mit 47,0 bis 47,3 % TM über dem Richtwert von HOFFMANN ET AL. (2010), die Aufwüchse mit den niedrigsten Gehalten lagen im Bereich des Richtwerts.

Im Wasserstoffgehalt bestanden keine nennenswerten Unterschiede sowohl zwischen den Pflanzengesellschaften als auch den Nutzungsvarianten innerhalb der Pflanzengesellschaften. Der Gehaltsbereich lag zwischen 5,9 und 6,2 % und damit deutlich unter dem Richtwert von HOFFMANN ET AL. (2010).

Gleiches gilt für den Sauerstoffgehalt, nur das Rohrglanzgrasröhricht lag hier tendenziell etwas höher als die anderen Pflanzengesellschaften. Bei den zweischnittigen Nutzungsvarianten war der Sauerstoffgehalt in den zweiten Aufwüchsen etwas niedriger als bei den Frühlingsaufwüchsen. Der Sauerstoffgehalt aller Aufwüchse der untersuchten Pflanzengesellschaften lag unter dem Richtwert von HOFFMANN ET AL. (2010).

Tabelle 21: Heizwert, Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Sauerstoffgehalte der Aufwüchse der Dauergrünlandtypen [% i. d. TM] (n = 3 pro Variante und Aufwuchs)

Dauergrünlandtyp	Variante	Aufwuchs	Heizwert	C _{total}	H	O
			MJ kg TM	% TM	% TM	% TM
Schnabel-seggenried	1	1	16,99	47,03	6,15	38,88
	1	2	17,22	47,10	5,98	37,78
	2	1	17,14	47,13	6,00	38,29
	3	1	17,13	46,90	5,87	38,40
	4*	1	16,65	47,30	5,93	38,96
Rohrglanzgras-röhricht	1	1	16,82	46,40	6,19	41,27
	1	2	17,01	46,50	6,19	38,80
	2	1	16,76	46,07	6,07	40,17
	2	2	17,05	46,70	6,17	39,32
	3	1	16,97	46,50	6,15	40,46
	4*	1	16,99	46,40	6,34	41,74
Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese	1	1	16,64	46,47	5,97	39,34
	1	2	16,60	45,97	5,97	37,08
	2	1	16,87	46,87	5,90	38,69
	2	2	16,41	45,43	6,00	37,19
	3	1	16,80	46,23	5,94	36,77
	4*	1	15,77	45,80	5,97	35,08
Waldstorch-schnabel-Goldhaferwiese	1	1	16,42	46,00	6,10	39,40
	1	2	16,34	45,23	5,97	36,77
	2	1	16,24	45,43	6,01	39,25
	2	2	16,21	44,93	5,87	35,46
	3	1	16,83	46,47	6,18	40,24
	3	2	16,53	45,50	5,98	37,53
	4*	1	16,36	45,70	6,11	37,13
Pfeifengras-Streuwiese	1	1	16,90	47,10	6,02	37,74
	2	1	17,07	47,33	5,95	37,81
	3	1	17,17	46,43	6,00	39,86
	3	2	17,44	47,73	6,15	37,65
	4*	1	16,32	46,20	5,82	36,56
Stroh (RÖSCH ET AL., 2007)			17,1 – 17,6			
Richtwert Heu (HOFFMANN ET AL., 2010)			16,5	46,42	6,94	40,76

* Variante 4 n=1

Rohaschegehalt, Ascheerweichungstemperatur und deren beeinflussende Inhaltsstoffe (K, Ca, Mg)

Die Rohasche-, Kalium-, Magnesium- und Kalziumgehalte aller Aufwüchse sowie die Ascheerweichungstemperaturen ausgewählter Aufwüchse sind in Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22: Rohasche-, Kalium-, Magnesium- und Kalziumgehalt sowie die Ascheerweichungstemperatur der Aufwüchse der verschiedenen Dauergrünlandtypen (n =3 pro Variante und Aufwuchs)

Standort	Variante	Aufwuchs	Rohasche	K	Mg	Ca	Ascheerweichungstemperatur
			% TM	% TM	% TM	% TM	°C
Schnabelseggenried	1	1	6,27	1,29	0,16	0,40	873 (n=3)
	1	2	7,19	1,17	0,18	0,44	853 (n=3)
	2	1	6,89	1,11	0,17	0,46	
	3	1	7,30	0,84	0,17	0,52	913 (n=3)
	4*	1	6,35	0,61	0,14	0,49	
Rohrglanzgrasröhricht	1	1	4,67	0,94	0,31	0,42	
	1	2	6,08	0,71	0,43	0,68	
	2	1	6,19	1,79	0,19	0,39	903 (n=3)
	2	2	5,77	1,03	0,28	0,51	1 025 (n=2)
	3	1	4,99	0,86	0,27	0,52	1 070 (n=1)
	4*	1	3,92	0,48	0,17	0,46	
Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese	1	1	6,61	1,03	0,31	0,79	
	1	2	9,07	1,22	0,37	0,99	
	2	1	6,93	0,96	0,33	0,87	
	2	2	9,04	1,06	0,31	0,92	
	3	1	8,80	1,67	0,28	0,72	1 015 (n=2)
	4*	1	11,20	1,07	0,29	0,82	
Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese	1	1	6,94	1,63	0,33	0,65	1 360 (n=2)
	1	2	9,86	1,92	0,50	1,30	1 170 (n=2)
	2	1	7,60	1,95	0,33	0,78	
	2	2	11,21	1,94	0,54	1,53	
	3	1	5,53	1,07	0,42	0,86	
	3	2	8,78	0,80	0,65	1,38	
	4*	1	9,30	0,87	0,46	0,10	
Pfeifengras-Streuwiese	1	1	7,57	1,07	0,30	1,13	
	2	1	7,40	0,96	0,30	1,17	1 120 (n=2)
	3	1	6,10	1,25	0,27	0,93	
	3	2	6,16	1,32	0,25	0,81	
	4*	1	9,88	1,04	0,30	1,09	
Stroh (RÖSCH ET AL., 2007)			5,00	1,00		0,30	885
			-	-		-	-
Richtwert Heu (HOFFMANN ET AL., 2010)			6,00	1,80		0,40	930
			8,78				

* Variante 4 n=1

Im Vergleich zu Stroh, lagen die **Rohaschegehalte** der Aufwüchse aller Pflanzengesellschaften, mit Ausnahme des Rohrglanzgrasröhrchts deutlich höher.

Gegenüber dem Richtwert von 8,8 % TM für den Aschegehalt von Heu für die thermische Nutzung nach HOFFMANN ET AL. (2010) (Tabelle 6 Seite 18) lagen jedoch nur die 2. Aufwüchse sowie die Variante 4 der Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese und der Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese darüber. Gleiches gilt für die 4. Variante der Pfeifengras-Streuwiese.

Mit Ausnahme der 2. Variante des Rohrglanzgrasröhrchts, lagen grundsätzlich bei allen anderen zweischnittigen Varianten die Rohaschegehalte in den 2. Aufwüchsen über den Gehalten in den 1. Aufwüchsen.

Die Kaliumgehalte aller Aufwüchse der untersuchten Pflanzengesellschaften bewegten sich im Bereich von Stroh. Zwischen den Pflanzengesellschaften bestanden deutliche Unterschiede im Kaliumgehalt, wobei das Rohrglanzgrasröhrcht und das Schnabelseggenried die niedrigsten Werte aufwiesen.

Zwischen den Pflanzengesellschaften bestanden auch deutliche Unterschiede im Magnesiumgehalt der geernteten Biomasse. Die Gehalte lagen in den Aufwüchsen der verschiedenen Nutzungsvarianten zwischen 0,14 % und 0,65 %. Sehr hohe Magnesiumgehalte wurden dabei in den Aufwüchsen der Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese gefunden, sehr niedrige Gehalte in den Aufwüchsen des Schnabelseggenrieds.

Die Kalziumgehalte der Grasaufwüchse der Pflanzengesellschaften waren überwiegend deutlich höher als im Stroh. Bei den verschiedenen Nutzungsvarianten schwankten die Gehalte zwischen 0,39 und 1,53 % i.d.TM. Damit lagen nur das Schnabelseggenried und nur Variante 2 des Rohrglanzgrasröhrchts im Bereich von Stroh.

Die bestimmten Ascheerweichungstemperaturen ausgewählter Varianten lagen mit Ausnahme des Schnabelseggenrieds mehrheitlich deutlich über denen von Stroh. Die höchsten Ascheerweichungstemperaturen hatten die Aufwüchse der Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese

Aschegehalt, Faserbestandteile und Heizwert

In Tabelle 23 sind die Gehalte von Rohfaser und Lignin (ADL), sowie der Dauergrünlandaufwüchse aufgelistet.

Wie schon im Kapitel 4.2 besprochen, erreichen die in 4.1 identifizierten Nutzungsvarianten Rohfasergehalte zwischen 27,6 % TM bei der Pfeifengras-Streuwiese und 34,9 % TM bei dem Rohrglanzgrasröhrcht und liegen damit deutlich unter denen von Stroh.

Die Ligningehalte der ertragreichsten Nutzungsvarianten bzw. der Nutzungsvarianten mit optimalem Ertrag, schwankten zwischen 5,18 % TM und 11,20 % TM. Die tendenziell höchsten Gehalte hatten generell die Aufwüchse des Schnabelseggenrieds, die tendenziell niedrigsten die Aufwüchse der Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese. Der Ligningehalt der ertragreichsten Nutzungsvarianten der anderen Pflanzengesellschaften lag im Bereich von 6,3 % TM bis 8,3 % TM

Die Gehalte in den Aufwüchsen der nur alle zwei Jahre beernteten Nutzungsvarianten aller untersuchten Pflanzengesellschaften lagen tendenziell über den Aufwüchsen der anderen Nutzungsvarianten.

Tabelle 23: Rohfaser-, Lignin- und Rohaschegehalte (550°C, 3 h) sowie Heizwert der Aufwüchse der Dauergrünlandtypen (n = 3 pro Variante und Aufwuchs, graue Felder: Nutzungsvarianten bei denen das Ertragspotenzial ausgeschöpft bzw. das Ertragsoptimum erreicht wurde (siehe Kapitel 4.1))

Dauergrünlandtyp	Variante	Aufwuchs	Rohfaser	Lignin (ADL)
			% TM	% TM
Schnabelseggenried	1	1	30,37	6,94
	1	2	27,17	7,99
	2	1	29,00	8,64
	3	1	29,93	10,43
	4*	1	30,50	11,20
Rohrglanzgrasröhricht	1	1	34,60	7,28
	1	2	30,23	7,36
	2	1	34,87	5,87
	2	2	31,07	7,31
	3	1	32,93	7,80
	4*	1	35,60	9,50
Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese	1	1	28,80	7,78
	1	2	24,80	5,94
	2	1	30,10	9,20
	2	2	25,50	5,72
	3	1	30,33	7,95
	4*	1	29,10	9,53
Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese	1	1	30,33	5,93
	1	2	22,47	5,67
	2	1	28,00	6,25
	2	2	21,10	5,18
	3	1	25,40	6,39
	3	2	21,83	6,09
	4*	1	26,20	8,74
Pfeifengras-Streuwiese	1	1	26,93	7,43
	2	1	27,60	8,29
	3	1	26,90	6,38
	3	2	24,90	5,39
	4*	1	28,70	11,00

* Variante 4 n=1

Gehalte der Korrosions- und Emissionsbildner (N, S, Cl)

Die Gehalte der für die Korrosion und Emissionen relevanten Elemente Stickstoff, Schwefel und Chlor sind in Tabelle 24 aufgelistet.

Tabelle 24: Gehalte der korrosions- und emissionsrelevanten Elemente in den Aufwüchsen der verschiedenen Dauergrünlandtypen (n = 3 pro Variante und Aufwuchs, graue Felder: Nutzungsvarianten bei denen das Ertragspotenzial ausgeschöpft bzw. das Ertragsoptimum erreicht wurde (siehe Kapitel 4.1))

Dauergrünlandtyp	Variante	Schnitt	N % TM	S % TM	Cl % TM
Schnabel- seggenried	1	1	1,56	0,22	0,64
	1	2	1,72	0,23	0,59
	2	1	1,46	0,22	0,56
	3	1	1,34	0,19	0,47
	4*	1	1,31	0,16	0,33
Rohrglanzgras- röhricht	1	1	1,23	0,24	0,98
	1	2	2,11	0,33	1,01
	2	1	1,26	0,24	1,10
	2	2	1,74	0,29	0,93
	3	1	1,63	0,27	0,80
	4*	1	1,39	0,21	0,42
Waldengelwurz- Kohldistel- Feuchtwiese	1	1	1,42	0,19	0,61
	1	2	1,57	0,29	0,70
	2	1	1,41	0,20	0,62
	2	2	2,05	0,28	0,60
	3	1	2,01	0,22	0,91
	4*	1	1,76	0,19	0,59
Waldstorcheschnabel- Goldhaferwiese	1	1	1,41	0,15	0,85
	1	2	1,98	0,19	1,11
	2	1	1,57	0,13	1,07
	2	2	2,33	0,20	1,03
	3	1	1,39	0,19	0,48
	3	2	1,89	0,32	0,23
	4*	1	1,55	0,21	0,34
Pfeifengras- Streuwiese	1	1	1,43	0,13	0,20
	2	1	1,38	0,13	0,19
	3	1	1,47	0,13	0,19
	3	2	2,14	0,17	0,17
	4*	1	1,42	0,12	0,22

* Variante 4 n=1

Die Stickstoffgehalte der untersuchten Pflanzengesellschaften lagen bei allen Nutzungsvarianten um ein Vielfaches über denen von Stroh, selbst bei Herbstmahd alle zwei Jahre. Dabei wiesen die zweiten Aufwüchse noch deutlich höhere Gehalte als die ersten Aufwüchse auf. Der Stickstoffgehalt der Nutzungsvarianten mit Ausnutzung des Ertragspotenzials bzw. Ertragoptimums (graue Felder in Tabelle 24), lag in den ersten Aufwüchsen der zweischnittigen Nutzungsvarianten zwischen 1,26 % TM und 1,56 % TM, bei den zweiten Aufwüchsen zwischen 1,72 % TM und 2,33 % TM. Die Aufwüchse der hier betrachteten einschnittigen Nutzungsvarianten hatten Stickstoffgehalte zwischen 1,31 % TM und 2,01 % TM.

Auch die Schwefelgehalte lagen bei allen Pflanzengesellschaften um ein Vielfaches über den Gehalten von Stroh. Zwischen den Pflanzengesellschaften bestanden deutliche Unterschiede. In der Biomasse der Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese und insbesondere der Pfeifengras-Streuwiese sind die niedrigsten Gehalte ermittelt wurden. Die anderen Pflanzengesellschaften unterschieden sich tendenziell nicht und liegen im Schwefelgehalt deutlich höher. Die zweiten Aufwüchse der zweischnittigen Nutzungsvarianten wiesen tendenziell höhere Gehalte auf als die ersten Aufwüchse.

Die Chlorgehalte der Pflanzengesellschaften liegen mehrheitlich im Bereich von Stroh. Die Gehalte der Pfeifengras-Streuwiese lagen deutlich unterhalb des Gehaltes von Stroh. Bei den Nutzungsvarianten mit höchstem bzw. optimalem Ertrag (in Tabelle 24 grau gekennzeichnet) bestand eine deutliche Differenzierung zwischen den Pflanzengesellschaften. Die gedüngten Nutzungsvarianten der Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese und des Rohrglanzgrasröhrichts enthielten über 1 % Chlor i.d.TM, während das Schnabelseggenried im Bereich von 0,6 %, die Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese im Bereich von 0,9 % und die Pfeifengras-Streuwiese im Bereich von 0,2 % lagen.

Schwermetallgehalte

Die Gehalte von Arsen, Cadmium, Blei, Chrom, Thallium, Quecksilber und Zink sind in Tabelle 25 dargestellt und zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Pflanzengesellschaft.

In der Biomasse des Rohrglanzgrasröhrichts lagen die Gehalte aller untersuchten Elemente am niedrigsten. Hohe Schwermetallgehalte, speziell Arsen, Cadmium, Blei und Chrom, konnten in den Aufwüchsen der Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese ermittelt werden, wobei der höchste Bleigehalt unter allen Aufwüchsen und Pflanzengesellschaften bei der Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese bestimmt wurde. Die höchsten Zinkgehalte lagen in der Biomasse des Schnabelseggenrieds vor. Die Schwermetallgehalte in den zweiten Aufwüchsen der zweischnittigen Varianten lagen mehrheitlich deutlich über den Gehalten in den ersten Aufwüchsen.

Tabelle 25: Gehalte von Arsen, Cadmium, Blei, Chrom, Thallium, Quecksilber und Zink im Mittel der drei Versuchsjahre in den Aufwüchsen der untersuchten Pflanzengesellschaften (wobei **blaue Felder** niedrigste Gehalte und **orange Felder** höchste Gehalte aufweisen)

Dauergrün- landtyp	Variante	Aufwuchs	As mg kg ⁻¹ TM	Cd mg kg ⁻¹ TM	Pb mg kg ⁻¹ TM	Cr mg kg ⁻¹ TM	Tl mg kg ⁻¹ TM	Hg mg kg ⁻¹ TM	Zn mg kg ⁻¹ TM
Schnabel- seggenried	1	1	0,273	0,12	0,77	0,65	0,04	0,012	61,6
	1	2	0,397	0,12	1,18	0,93	0,07	0,021	92,1
	2	1	0,317	0,12	0,85	0,55	0,05	0,020	80,3
	3	1	0,283	0,14	1,04	0,72	0,04	0,025	105,0
	4*	1	0,240	0,20	1,15	0,82	0,03	0,022	109,0
Rohrglanzgras- röhricht	1	1	0,074	0,02	0,15	0,21	0,03	0,005	27,7
	1	2	0,066	0,03	0,33	0,29	0,02	0,015	58,0
	2	1	0,067	0,02	0,15	0,26	0,01	0,006	25,5
	2	2	0,088	0,03	0,41	0,33	0,02	0,017	51,8
	3	1	0,093	0,04	0,52	0,39	0,03	0,016	45,4
	4*	1	0,081	0,04	0,50	0,33	0,02	0,015	41,9
Waldengelwurz- Kohldistel- Feuchtwiese	1	1	0,220	0,45	0,74	1,00	0,03	0,013	46,5
	1	2	0,288	0,62	1,22	1,56	0,03	0,016	56,5
	2	1	0,117	0,49	0,51	0,57	0,02	0,014	50,0
	2	2	0,533	0,74	1,91	3,97	0,03	0,019	66,3
	3	1	0,658	1,01	1,94	1,32	0,03	0,018	76,0
	4*	1	1,230	0,74	3,13	5,06	0,05	0,025	64,7
Waldstorchschnabel- Goldhaferwiese	1	1	0,111	0,22	0,74	0,49	0,01	0,007	38,2
	1	2	0,275	0,23	1,95	0,99	0,02	0,023	42,4
	2	1	0,174	0,17	0,96	0,68	0,01	0,012	34,6
	2	2	0,346	0,22	1,95	1,21	0,02	0,022	46,7
	3	1	0,049	0,22	0,50	0,26	0,01	0,008	37,7
	3	2	0,198	0,30	1,66	0,74	0,02	0,020	46,4
	4*	1	0,420	0,40	4,25	1,59	0,03	0,040	63,5
Pfeifengras- Streuwiese	1	1	0,176	0,09	0,90	3,32	0,03	0,013	52,0
	2	1	0,150	0,07	0,78	1,63	0,02	0,014	53,8
	3	1	0,082	0,05	0,31	0,44	0,02	0,012	43,8
	3	2	0,105	0,08	0,47	0,81	0,02	0,010	57,9
	4*	1	0,430	0,11	2,26	5,92	0,06	0,021	58,0

* Variante 4 n=1

Die Arsengehalte variierten zwischen 0,049 mg kg⁻¹ TM und 1,230 mg kg⁻¹ TM, wobei die Aufwüchse der Waldstorchschnabel-Kohldistelwiese tendenziell die höchsten Gehalte aufwiesen, während die Aufwüchse des Rohrglanzgrasröhrichts die niedrigsten Gehalte enthielten.

Die Cadmiumgehalte lagen zwischen 0,02 mg kg⁻¹ TM und 1,01 mg kg⁻¹ TM. Die niedrigsten Gehalte hatten die Aufwüchse des Rohrglanzgrasröhrichts, gefolgt von den Aufwüchsen der Pfeifengras-Streuwiese und des Schnabelseggenrieds. In den Aufwüchsen der Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese und besonders der Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese wurden die höchsten Gehalte ermittelt.

Die ermittelten Bleigehalte, die zwischen $0,15 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ und $4,25 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ lagen, waren bei dem Rohrglanzgrasröhricht und der Pfeifengras-Streuwiese tendenziell am niedrigsten, während sie bei der Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese und der Waldstorcheschnabel-Goldhaferwiese am höchsten waren. Das Schnabelseggenried nimmt eine Mittelstellung ein.

Die Chromgehalte variierten zwischen $0,21 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ und $5,92 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$. Die tendenziell höchsten Gehalte wiesen die Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese und besonders die Pfeifengras-Streuwiese auf, wobei die beiden höchsten Werte in den nur alle zwei Jahre geernteten Aufwüchsen ermittelt wurden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass es sich bei Variante 4 um nur je einen Analysewert handelt. Die tendenziell niedrigsten Chromgehalte wiesen die Aufwüchse des Rohrglanzgrasröhrichts auf, gefolgt von den Aufwüchsen des Schnabelseggenrieds und der Waldstorcheschnabel-Goldhaferwiese.

Die Thalliumgehalte lagen zwischen $0,01 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ und $0,07 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$. Die Aufwüchse des Schnabelseggenrieds wiesen hier die tendenziell höchsten Gehalte auf, während die Aufwüchse der Waldstorcheschnabel-Goldhaferwiese und des Rohrglanzgrasröhrichts die tendenziell niedrigsten Gehalte hatten. Die Aufwüchse der Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese und der Pfeifengras-Streuwiese lagen mit ihren Thalliumgehalten dazwischen.

Die Quecksilbergehalte variierten in den Aufwüchsen zwischen $0,005 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ und $0,040 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$. Die tendenziell höchsten Quecksilbergehalte wurden in den Aufwüchsen der Waldstorcheschnabel-Goldhaferwiese und des Schnabelseggenrieds gefunden. Die niedrigsten in den Aufwüchsen des Rohrglanzgrasröhrichts und der Pfeifengras-Streuwiese.

Die Zinkgehalte schwankten zwischen $25,5 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ und $109,0 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$. Dabei hatten die Aufwüchse der Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese, des Schnabelseggenrieds und der Pfeifengras-Streuwiese die tendenziell höchsten, die Aufwüchse der Waldstorcheschnabel-Goldhaferwiese und des Rohrglanzgrasröhrichts die tendenziell niedrigsten Gehalte.

4.4 Pflanzenbestand

4.4.1 Zusammensetzung und Artenvielfalt

Für die Bewertung der untersuchten Pflanzenbestände wurden die Gesamtartenzahl, der Grünlandwert des Bestandes sowie die Zusammensetzung des Pflanzenbestandes und deren Veränderungen im Verlauf der Versuchsperiode zugrunde gelegt (Tabelle 26 sowie im Anhang A 1 bis A 5).

Tabelle 26: Bewertung der Pflanzenbestände - Grünlandwert und Artenzahl

Pflanzengesellschaft	Jahr	Artenzahl				G-Wert			
		Variante/Nutzungssystem				Variante/Nutzungssystem			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese	2008	32	37	39	35	22	24	26	26
	2009	31	38	38	35	24	29	31	27
	2010	34	37	38	32	25	27	28	24
	Tendenz	↗	~	~	↘	↗	↗	↗	↘
Schnabelseggenried	2008	4	4	6	6	4	6	4	3
	2009	7	7	8	8	8	8	7	8
	2010	7	7	9	8	9	8	8	9
	Tendenz	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese	2008	23	25	26	23	16	19	17	18
	2009	25	28	28	26	19	22	21	24
	2010	29	30	28	28	26	24	21	24
	Tendenz	↗	↗	~	↗	↑	↗	↗	↗
Rohrglanzgrasröhricht	2008	16	14	8	10	5	6	6	5
	2009	14	16	10	11	4	6	8	6
	2010	15	19	12	8	4	7	8	4
	Tendenz	~	↗	↗	↘	~	~	↗	↘
Pfeifengras-Streuwiese	2008	45	40	40	40	81	79	78	77
	2009	47	40	41	42	83	78	79	78
	2010	47	41	42	42	83	80	80	72
	Tendenz	↗	~	↗	↗	↗	~	↗	↘
Legende: ~ weitgehend gleichbleibend ↗ tendenzielle Verbesserung ↘ tendenzielle Verschlechterung									

Beim **Schnabelseggenried (Großseggenried)** handelt es sich um einen stabilen, artenarmen Bestand, in dem die Schnabelsegge (*Carex rostrata*) vorherrscht und nur Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) noch größere Ertragsanteile einnimmt. Innerhalb von drei Versuchsjahren zeigen sich nur tendenzielle Veränderungen in der Zusammensetzung des Bestandes. Zweischnittnutzung (Variante 1) wie auch der jährlich einmalige Schnitt im Sommer (Variante 2) haben einen Rückgang des Ertragsanteiles (EA) von Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) und der Schwertlilie (*Iris pseudocorus*) bewirkt, während Sumpf-Labkraut (*Galium palustre*) eine leichte und vor allem die Schnabelsegge (*Carex rostrata*) eine deutliche Zunahme verzeichnen. Von der regelmäßigen Mahd des Rieds, d.h. unabhängig vom Nutzungstermin und -häufigkeit, profitiert die Polei-Minze (*Mentha pulegium*). Die Herbstmahd, hat sowohl bei jährlichem als auch zweijährigem Schnitt das Vorkommen von Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*), Blasensegge (*Carex resicaria*) und Wasserschaden (*Glyceria maxima*) gefördert und dabei die Schnabelsegge (*Carex rostrata*) kontinuierlich zurückgedrängt.

Die für diese Grünlandpflanzengesellschaft typische Artenzahl sowie der dadurch auch sehr niedrige G-Wert sind bei allen Nutzungssystemen tendenziell verbessert worden.

Der Erhaltungszustand ist generell leicht verbessert worden.

Das **Rohrglanzgrasröhricht** hat im Untersuchungszeitraum mit Ausnahme des Nutzungssystems „Herbstmahd aller 2 Jahre“ (Variante 4) kaum nennenswerte Veränderungen in der Zusammensetzung des Pflanzenbestandes erfahren. Die Nutzung alle 2 Jahre hat zur Erhöhung des Ertragsanteiles von Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) zu Lasten von Wiesenfuchsschwanz (*Alopecurus pratensis*) und Knickfuchsschwanz (*Alopecurus geniculatus*) sowie zur tendenziellen Verringerung der Artenzahl wie auch des G-Wertes geführt.

Der Erhaltungszustand ist sowohl bei Zweischnittnutzung mit Kaliumdüngung (Variante 2) als auch durch jährliche Mahd im Herbst (Variante 3) tendenziell verbessert worden. Bei letzterem haben Wiesenrispe (*Poa pratensis*) und Weißes Straußgras (*Agrostis gigantea*) eine Förderung im Bestandesanteil erfahren.

Die **Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese** in ihrer Ausbildung als Mädesüß-Hochstaudenflur hat nach Wiedereinführung einer regelmäßigen Nutzung eine deutliche Verbesserung in der Bestandeszusammensetzung erfahren, indem das vorherrschende Mädesüß (*Filipendula ulmaria*) wie auch das mit hohem EA vertretene Wollige Honiggras (*Holcus lanatus*) deutlich zurückgedrängt worden sind. Dadurch konnten Wiesenfuchsschwanz (*Alopecurus pratensis*), Gemeines Ruchgras (*Anthoxanthum odoratum*), Wiesenschwingel (*Festuca pratensis*), Flechtstraußgras (*Agrostis stolonifera*), verschiedene Seggenarten (*Carex leporina*, *Carex panicea*, *Carex rostrata*) aber auch Sumpfschachtelhalm (*Equisetum palustre*), letzteres vor allem bei Mahd alle zwei Jahre (Variante 4), ihren spezifischen EA erhöhen.

Die Gesamtartenzahl ist bei allen Nutzungssystemen angestiegen. Das gilt auch für den G-Wert, insbesondere bei Zweischnittnutzung mit erster Mahd Ende Juni (Variante 1).

Der Erhaltungszustand ist generell verbessert worden. Jährlicher Schnitt im Sommer (Variante 3) wie auch die Herbstmahd alle zwei Jahre (Variante 4) haben vergleichbare Effekte erbracht und stellen die Mindestpflege dar.

Auf der **Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese** sind bereits vor Versuchsbeginn achtjährig die Nutzungssysteme der Varianten 1 - 3 praktiziert worden. Das Nutzungssystem Variante 4 folgte auf eine achtjährig betriebene, ungedüngte Zweischnittnutzung mit Mahd des ersten Aufwuchses zum 1. Juli. Dadurch zeigen sich charakteristische Pflanzenbestände auf den einzelnen Versuchsvarianten. Bei Zweischnittnutzung und NPK-Düngung (Variante 1) ist der Typ der Goldhaferwiese erhalten geblieben. Bei Verzicht auf die Stickstoffdüngung, aber Aufrechterhaltung einer entzugsorientierten Grunddüngung mit Phosphor und Kalium (Variante 2), hat sich ein für die gründigen Schieferschutt-Braunerden dem Zieltyp entsprechender Bestand herausgebildet. Die Zweischnittnutzung ohne jegliche Nährstoffzufuhr (Variante 3) induziert den Magerrasen-Typ, in dem bei vergleichbarer Zusammensetzung des Bestandes einzelne Arten in ihrem EA gegenüber der mit P und K gedüngten Variante abweichen. Die Herbstmahd alle zwei Jahre (Variante 4) ist etwas artenärmer als die ungedüngte Zweischnittnutzung (Variante 3). Bei der Bestandeszusammensetzung treten aber keine nennenswerten Unterschiede im jeweiligen Ertragsanteil der einzelnen Arten auf.

Der Erhaltungszustand entspricht bei Zweischnittnutzung und entzugsorientierter P- und K-Düngung dem produktiven Goldhaferwiesentyp und bei ungedüngter Zweischnittnutzung

dem Magerwiesentyp, bei dem sowohl die Gesamtartenzahl als auch der G-Wert tendenziell höher sind.

In der **Pfeifengras-Streuwiese**, als artenreichste der untersuchten Wiesentypen, treten zwar jahresbedingt größere Schwankungen im Ertragsanteil einzelner Arten auf, jedoch sind, abgesehen von einigen wenigen Arten, keine nennenswerten Unterschiede zwischen den vier Nutzungssystemen/Varianten festzustellen. Wolliges Honiggras (*Holcus lanatus*) wird bei Zweischnittnutzung (Variante 3) gegenüber allen anderen Varianten etwas stärker zurückgedrängt und Blaues Pfeifengras (*Molinia caerulea*) etwas stärker gefördert. Bei jährlicher Herbstmahd (Variante 2) wird gegenüber den anderen Nutzungssystemen Sumpfschilf (*Carex acutiformis*) etwas stärker zurückgedrängt und Fleischrotes Knabenkraut (*Dactylorhiza incarnata*) deutlich gefördert. Mädesüß (*Filipendula ulmaria*) wird bei regelmäßiger Mahd zurückgedrängt, während es bei der Mahd alle zwei Jahre (Variante 4) im Ertragsanteil deutlich ansteigt.

In der Gesamtartenzahl wie auch bei den Artenveränderungen, sind demnach keine nennenswerten Unterschiede zwischen den vier Nutzungssystemen/Varianten festzustellen. Das gilt auch für den G-Wert aller jährlich genutzten Bestände, während bei der Mahd alle zwei Jahre (Variante 4) der G-Wert tendenziell abnimmt.

Der Erhaltungszustand ist am zweckmäßigsten mit alljährlicher Herbstmahd (Variante 2) ziel führend zu sichern.

4.4.2 Struktur des Pflanzenbestandes

Die Bewertungskriterien für die Struktur eines Pflanzenbestandes – Strukturindex und Kräuteranteil sind für den Untersuchungszeitraum in Tabelle 27 zusammengestellt.

Das **Schnabelseggenried** besteht fast ausschließlich aus Obergräsern und ist sehr kräuterarm. Nutzungsbedingte Veränderungen sind im Index nicht zu erkennen, während der Kräuteranteil, mit Ausnahme der jährlich einmaligen Mahd im Sommer (Nutzungsvariante 2), leicht ansteigt.

Das **Rohrglanzgrasröhricht** besteht aus einer dominierenden Oberschicht und einer Mittelschicht, die bei Herbstmahd (jährlich bzw. alle 2 Jahre - Variante 4) eine tendenzielle Verringerung erfährt.

Auf der **Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese** hat das Nutzungssystem generell eine Verbesserung der Habitatstruktur bewirkt, indem der Kräuteranteil deutlich zurückgedrängt worden ist.

Auf der **Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese** hat sich in Abhängigkeit von der Düngungs- und Nutzungsintensität eine charakteristische Verbesserung der Struktur des Bestandes vollzogen. Mit der Reduzierung der Bewirtschaftungsintensität wird die Oberschicht lückiger und es bilden sich ausgeprägte Mittel- und Unterschichten heraus. Bei Düngungsverzicht hat sich im Untersuchungszeitraum eine ideale Bestandesstruktur entwickelt. Diese Veränderungen stehen in engem Zusammenhang mit der unterschiedlich starken Ausbreitung der Kräuter im Bestand.

Auf der artenreichen **Pfeifengras-Streuwiese** liegt eine mosaikartige Struktur vor, die nur bei Mahd alle 2 Jahre (Variante 4) eine tendenzielle Verschlechterung erfahren hat. Bei

Herbstmahd (Variante 2) ist eine leichte Erhöhung des Kräuteranteils zu verzeichnen, indem sich naturschutzfachlich besonders wertvolle Arten ausgebreitet haben.

Tabelle 27: Bewertung der Pflanzenbestände - Strukturindex und Kräuteranteil

Pflanzengesellschaft	Jahr	Schichtungsindex				Kräuteranteil (EA%)			
		Nutzungssystem/Variante				Nutzungssystem/Variante			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Schnabelseggenried	2008	3	4	4	3	1	2	2	2
	2009	2	2	2	1	3	2	3	5
	2010	2	2	2	0	4	3	5	5
	Tendenz	~	~	~	~	↗	~	↗	↗
Rohrglanzgrasröhricht	2008	27	28	27	21	2	2	1	0
	2009	27	29	25	20	1	1	0	0
	2010	29	27	22	17	1	0	0	0
	Tendenz	~	~	↘	↘	~	~	~	~
Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese	2008	2	8	7	4	53	64	50	50
	2009	3	17	17	17	44	49	37	38
	2010	21	28	23	22	42	43	35	44
	Tendenz	↑	↑	↑	↑	↓	↓↓	↓↓	↓
Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese	2008	41	51	51	48	23	26	18	21
	2009	50	70	92	85	30	38	38	34
	2010	49	65	97	88	31	35	41	38
	Tendenz	↗	↑	↑↑	↑↑	↑	↑	↑↑	↑↑
Pfeifengras-Streuwiese	2008	60	62	65	61	49	45	47	47
	2009	55	59	63	56	51	53	56	55
	2010	60	63	63	53	49	49	48	52
	Tendenz	~	~	~	↘	~	↗	~	↗
Legende:									
↑↑		sehr gute Entwicklung				↓↓		sehr starke Verschlechterung	
~		weitgehend gleichbleibend				↓		deutliche Verschlechterung	
↗		tendenzielle Verbesserung				↘		tendenzielle Verschlechterung	

4.5 Nährstoffversorgung der Böden

Im Vergleich zu der Bodenuntersuchung zu Versuchsbeginn gab es im Verlauf der drei Jahre und im Vergleich der Nutzungsvarianten an keinem Standort nennenswerte Veränderungen des pH-Wertes, daher findet an dieser Stelle keine gesonderte Darstellung dieser Werte statt.

In Tabelle 28 sind die Nährstoffgehalte der Bodenuntersuchung vor Versuchsbeginn und nach Versuchsende dargestellt.

Tabelle 28: Bodenuntersuchung nach Versuchsende (0 - 10 cm Tiefe) im Vergleich zum Versuchsbeginn (grau hinterlegte Felder)

Grünlandtyp	Variante	P		K		Mg	
		mg 100 g ⁻¹ Boden		mg 100g ⁻¹ Boden		mg 100 g ⁻¹ Boden	
Schnabelseggenried Elsfleth	1	6,0	7,0	4,0	4,0	10	9,0
	2		7,0		4,0		11,0
	3		5,0		3,0		10,0
	4		6,0		3,0		10,0
Rohrglanzgrasröhricht Ebereschenhof	1	11,6	10,8	12,9	17,0	21,4	21,0
	2		13,4		27,0		26,3
	3		12,9		22,0		22,7
	4		13,9		24,0		23,3
Waldengelwurz-Kohldistel- Feuchtwiese Oelsnitz	1	1,2	1,8	6,8	9,7	30,2	23,2
	2		1,4		7,2		25,1
	3		1,3		5,9		26,1
	4		1,2		5,9		27,7
Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese Oberweißbach	1	3,8	2,0	8,6	7,0	k.A.	25,0
	2		2,0		6,0		31,0
	3		2,0		3,0		34,0
	4		2,0		3,0		32,0
Pfeifengras-Streuwiese Immenstadt	1	3,5	2,2	28,2	21,8	29,8	24,5
	2		2,2		32,0		26,1
	3		2,6		25,7		27,6
	4		2,6		23,7		23,9

Auch im Phosphorgehalt gab es im Versuchszeitraum in allen Nutzungsvarianten keine nennenswerten Veränderungen. Ausnahmen waren die bereits zu Versuchsbeginn ohnehin niedrig versorgten Standorte Oberweißbach und Immenstadt. In Oberweißbach fand eine weitere Reduzierung um 1,8 mg 100 g⁻¹ Boden in allen Varianten statt. In Immenstadt nahm unter der jährlich einmal genutzten Variante der Phosphorgehalt im Boden um 1,3 mg 100 g⁻¹ Boden ab, in der zweischnittigen und in der nur alle zwei Jahre geernteten Variante um 0,9 mg 100 g⁻¹ Boden.

Die Kaliumgehalte zeigten weiterhin deutliche standortspezifische Unterschiede. Nennenswerte bewirtschaftungsbedingte Änderungen im Verlauf der Versuchsperiode ergaben sich hier nicht.

Die größten Abnahmen bei den Magnesiumgehalten zeigten die ertragreichsten Nutzungsvarianten, während bei der gedüngten zweischnittigen Nutzungsvariante des Rohrglanzgrasröhrchrs, durch die Verwendung von Patentkali, eine Zunahme in den Bodengehalten festgestellt werden konnte. Bei den anderen Varianten lagen die Veränderungen im Magnesiumgehalt im normalen Schwankungsbereich.

4.6 Heuverbrennung in einer Praxisanlage

Die Durchführung der Praxisverbrennungsversuche lag beim ILK-Dresden (BIRNBAUM UND BERGER, 2010). Zwischen der TLL und dem ILK besteht eine langjährige Zusammenarbeit. Dies ermöglicht u.a. eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu anderen Untersuchungen (HERING UND PEISKER, 2009).

4.6.1 Inhaltsstoffe des Versuchsbrennstoffs

Die Gehalte der für die Verbrennung relevanten Inhaltsstoffe und Elemente des untersuchten Brennstoffs Heu einer ungedüngten Glatthaferwiese sind in den Abbildung 10 bis Abbildung 13 dargestellt.

Die Gehalte an Rohasche, Rohfaser, Lignin (in Form von ADL), Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff sowie der Heizwert des Heus sind in Abbildung 10 gezeigt. Die Rohaschegehalte lagen bei 9,1 % TM, die Rohfaser bei 34,5 % TM und der Ligningehalt bei 7,0 % TM. Die Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Sauerstoffgehalte lagen zwischen 43,9 %, 6,0 % und 39,6 % i. d. TM, der Heizwert bei 16,1 MJ kg⁻¹ TM. Die Schwankungen innerhalb der Stichprobe sind relativ gering, lediglich der Rohfasergehalt variiert um ~ 10 % TM.

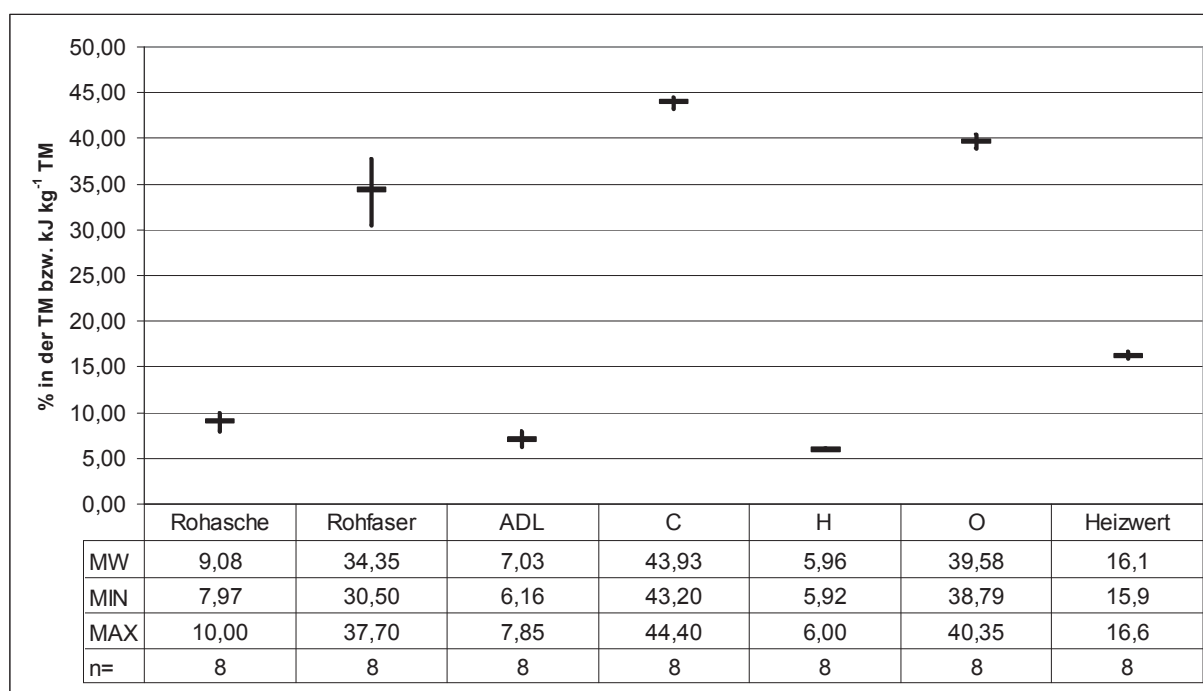


Abbildung 10: Gehalte von Rohasche, Rohfaser, Lignin in Form von ADL, Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff [% i. d. TM] sowie der Heizwert [MJ kg⁻¹ TM] des untersuchten Heus im Praxisversuch (n = 8)

Damit lag der Rohaschegehalt des Versuchsverbrennstoffs deutlich über dem Aschegehalt in Stroh und leicht über dem Richtwert nach (HOFFMANN ET AL., 2010), während der Rohfasergehalt den von Stroh deutlich unterschritt.

Die Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Sauerstoffgehalte lagen durchweg unterhalb der Richtwerte für Heu zur thermischen Nutzung (HOFFMANN ET AL., 2010). Der Heizwert lag im Mittel $1,0 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ TM}$ unterhalb des von Stroh.

In Abbildung 11 sind die Gehalte der für das Ascheschmelzverhalten relevanten Elemente Kalium, Magnesium und Kalzium sowie die Ascheerweichungstemperatur abgebildet. Der Kaliumgehalt lag bei 1,59 %, der Magnesiumgehalt bei 0,17 % und der Kalziumgehalt bei 0,87 % i. d. TM. Verglichen mit Stroh waren damit die im Versuchsverbrennstoff ermittelten mittleren Kaliumgehalte im Bereich von Stroh, während die Kalziumgehalte im Versuchsverbrennstoff im Mittel um den Faktor 2,1 höher lagen als in Stroh.

Die Ascheerweichungstemperatur lag bei 1099°C , damit zufriedenstellend hoch und höher als die Ascheerweichungstemperatur von Stroh.

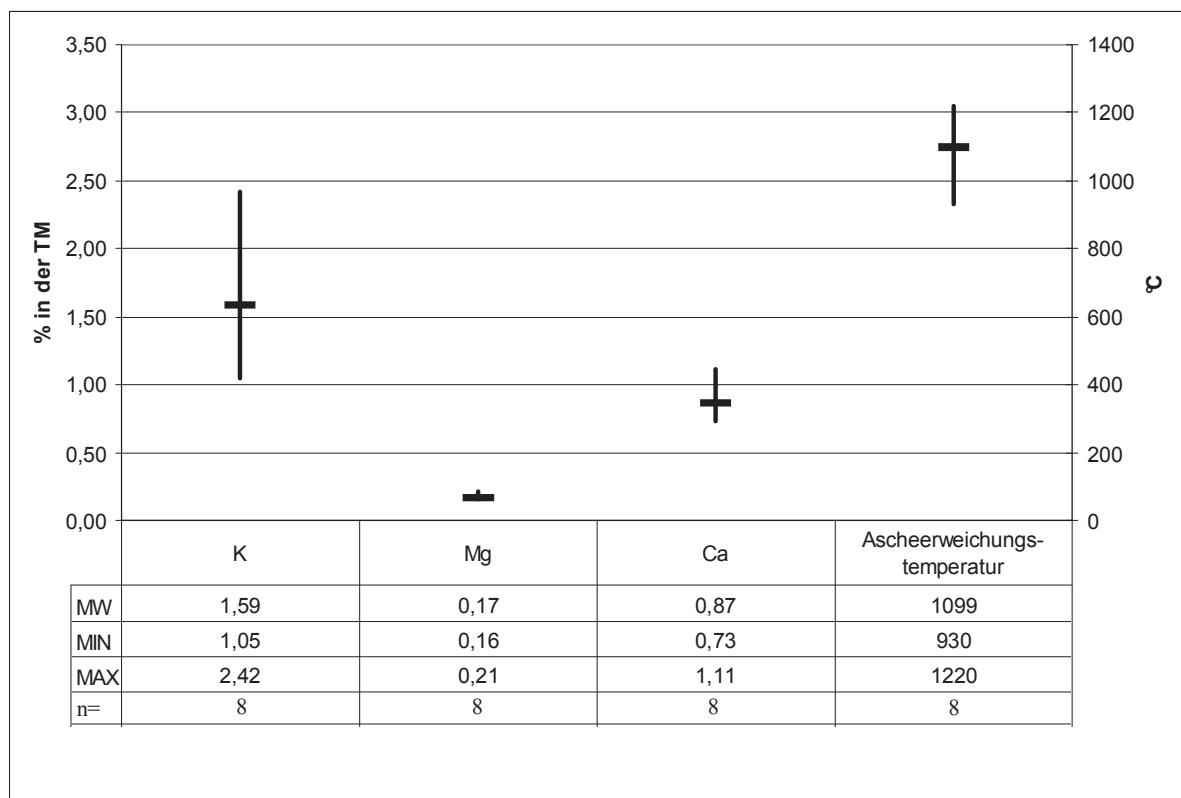


Abbildung 11: Gehalte von Kalium, Kalzium und Magnesium [% i. d. TM] sowie die Ascheerweichungstemperatur [$^\circ\text{C}$] des untersuchten Heus im Praxisversuch ($n = 8$)

Die Gehalte der emissions- und korrosionsrelevanten Elemente Stickstoff, Schwefel und Chlor des Versuchsverbrennstoffs Heu sind in Abbildung 12 dargestellt.

Der Stickstoffgehalt war mit 1,35 % i. d. TM deutlich höher als der Gehalt in Stroh, während der Schwefelgehalt mit 0,10 % i. d. TM noch im Bereich dessen von Stroh lag. Der Chlorgehalt des Versuchsverbrennstoffs dagegen lag mit 0,11 % i. d. TM um rund das 3- bis 8-fache niedriger als der Chlorgehalt im Stroh.

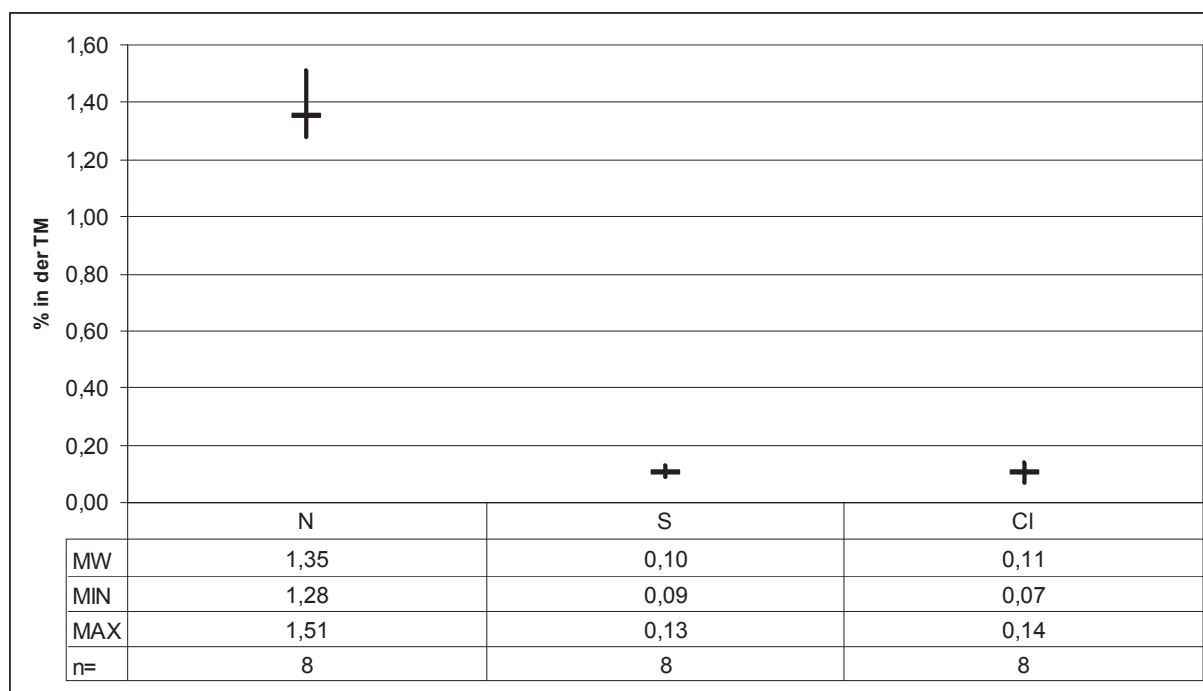


Abbildung 12: Gehalte von Stickstoff, Schwefel und Chlor [% i. d. TM] im untersuchten Heu des Praxisversuchs (n=8)

In Abbildung 13 sind die Gehalte von Arsen, Cadmium, Blei, Chrom, Thallium, Quecksilber und Zink abgebildet. Hierbei sind die Schwankungen innerhalb der Stichprobe relativ gering, lediglich beim Chrom und Zink schwankten die Werte bis zu 2 mg kg⁻¹ TM bzw. bis zu 3 mg kg⁻¹ TM um den entsprechenden Mittelwert.

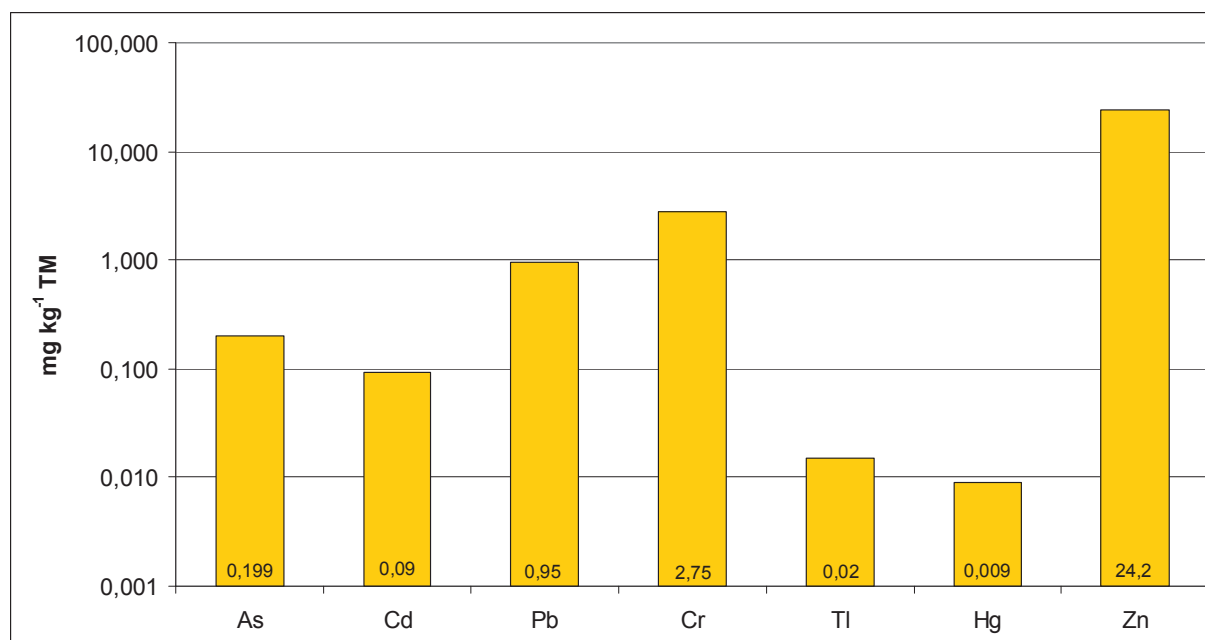


Abbildung 13: Gehalte von Arsen, Cadmium, Blei, Chrom, Thallium, Quecksilber, Zink [mg kg⁻¹ TM] im untersuchten Heu des Praxisversuchs (n = 8)

Die Gehalte der aerosolbildenden Elemente (HERING UND PEISKER, 2009) sowie die Summe der Aerosolbildner des im Versuch verbrannten Heus sind in Tabelle 29 dargestellt. Die Summe der Aerosolbildner schwankte zwischen 12 242 mg kg⁻¹ TM und 26 988 mg kg⁻¹ TM und lag im Mittel bei 18 093 mg kg⁻¹ TM. Den größten Teil der Aerosolbildner stellten die Elemente Kalium (86 % bis 90 %), Schwefel (5 % bis 7 %) und Chlor (5 % bis 6 %). Das Element Natrium stellte lediglich einen Anteil von 0,51 % bis 0,54 % während die Elemente Zink und Blei einen Anteil von unter 0,2 % und 0,006 % an der Summe der Aerosolbildner ausmachten.

Tabelle 29: Mittel-, Maximum- und Minimumwerte der aerosolbildenden Elemente sowie deren Summe im untersuchten Heu des Praxisversuchs (n = 8)

	S mg kg ⁻¹ TM	Cl mg kg ⁻¹ TM	K mg kg ⁻¹ TM	Na mg kg ⁻¹ TM	Zn mg kg ⁻¹ TM	Pb mg kg ⁻¹ TM	Summe Aerosolbildner mg kg ⁻¹ TM
Mittelwert	1 025	1 050	15 888	105,8	24,2	0,95	18 093
Minimum	900	700	10 500	66,3	21,0	0,30	12 242
Maximum	1 300	1 400	24 200	137,0	26,2	1,48	26 988

4.6.2 Emissionswerte

4.6.2.1 Kohlenmonoxid

Für die Leistungsgröße bzw. den eingesetzten Brennstoff (nach § 3 Nr. 8) gelten grundsätzlich die Grenzwerte der novellierten 1. BImSchV (Kapitel 2.3, Tabelle 5). Bei den durchgeführten Verbrennungsversuchen mit Landschaftspflegeheu konnte der aktuelle Grenzwert für Kohlenmonoxid (CO) für diesen Anlagenstandort (4 g/Nm³ - da Altanlage) als auch der für neu errichtete Anlagen (1 g/Nm³ - Anlagen, welche nach dem 22.03.2010 errichtet wurden) sowie der ab 2015 geltende Grenzwert (für ab 01.01.2015 errichtete Anlagen) eingehalten werden (jeweils bei 13 % Sauerstoffbezug).

Gegenwärtig gelten für diese konkrete Praxisanlage jedoch die Übergangsbestimmungen nach § 25 der neuen 1. BImSchV, d.h. bis zum Jahr 2025, die in der alten 1. BImSchV formulierten Anforderungen in Höhe von 4 g/Nm³ CO.

Die Ergebnisse zeigen, bei entsprechend auf den Brennstoff optimierter Einstellung der Anlage (CO-Minimierung), eine Reduzierung der CO-Konzentrationen auf etwa 10 % bis unter 5 % dieser Grenzwerte (Abbildung 14). Maßgebend für die Einhaltung ist der Nachweis eines ¼ h-Wertes während der wiederkehrenden Messung des Schornsteinfegers.

Vereinzelte kam es zu temporären Emissionsspitzen kommen (vgl. 3. Versuchstag), welche hauptsächlich auf Diskontinuitäten bei der Brennstoffbeschickung zurückzuführen sind.

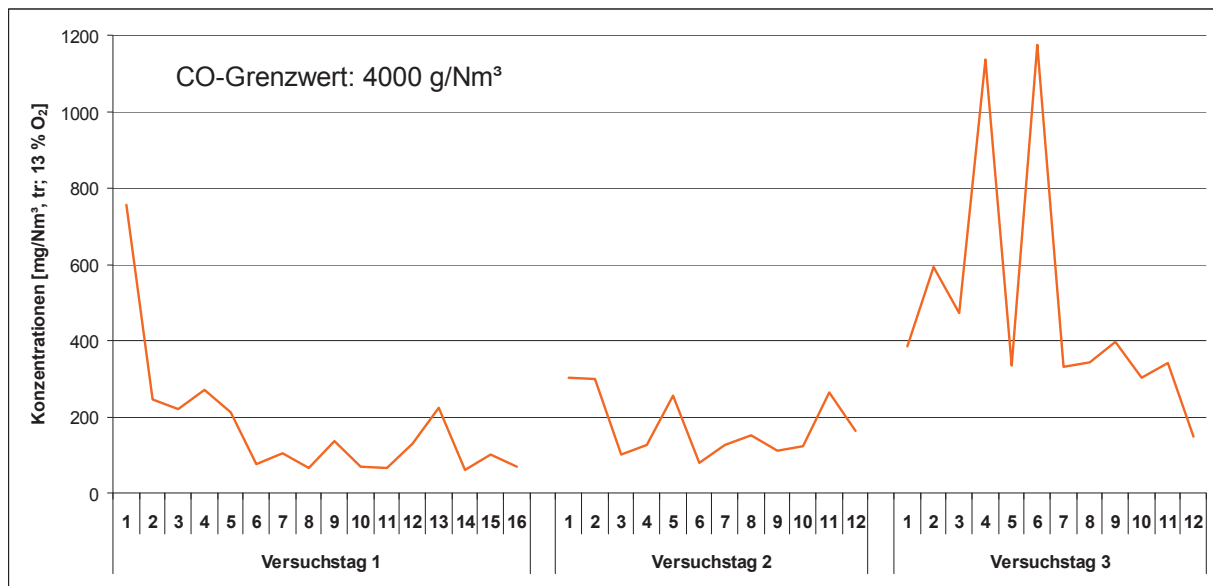


Abbildung 14: Verlauf der CO-Emissionen [mg/Nm³] an den drei Versuchstagen (¼ h-Werte bezogen auf 13 Vol.-% O₂ im trockenen Abgas unter Normbedingungen)

Abbildung 15 verdeutlicht, dass es innerhalb von 3 Messtagen (40 x ¼ h-Werte) bei allen relevanten Emissionen zu keiner Grenzwertüberschreitung während der Praxisversuche gekommen ist.

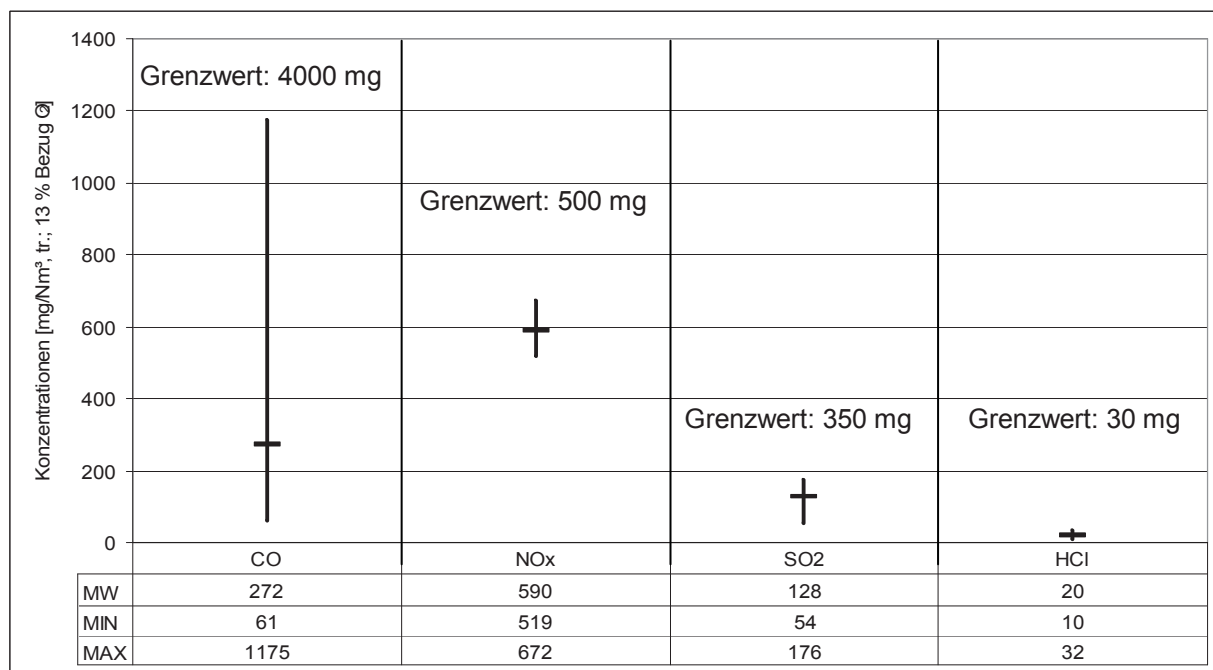


Abbildung 15: Emissionen beim Einsatz von Landschaftspflegeheu (¼h-Werte, n = 40; bezogen auf 13 Vol.-% O₂ im trockenen Abgas unter Normbedingungen)

4.6.2.2 Staub

In Bezug auf den zweiten praxisrelevanten Emissionsparameter **Gesamtstaub** wurden bereits im Vorfeld, aufgrund der Ergebnisse der Brennstoffinhaltsstoffuntersuchungen, deutlich höhere Staubkonzentrationen als beim Stroh erwartet (Kapitel 4.6.1, Tabelle 29 - Summe Aerosolbildner). Während in früheren Untersuchungen von Winterweizenstroh Summenwerte der aerosolbildenden Brennstoffinhaltsstoffe von $6\,865\text{ mg kg}^{-1}\text{ TM}$ ($n = 8$) und dazugehörige Staubkonzentrationen im Mittel von 48 mg/Nm^3 ($n = 10$) festgestellt wurden (HERING UND PEISKER, 2009), weisen die Ergebnisse der Aerosolbildner des untersuchten Landschaftspflegematerials mit $18\,093\text{ mg kg}^{-1}\text{ TM}$ ($n = 8$) ca. 2,6-fach höhere Werte auf.

Die Verbrennungsversuche ergaben bei den Rohgasuntersuchungen, während der Verbrennung des Heus, Staubgehalte im Mittel von 265 mg/Nm^3 (Abbildung 16) und überschritten damit deutlich die anlagentypischen Staubgehalte bei der Verbrennung von Stroh ($30 - 121\text{ mg/Nm}^3$) (HERING UND PEISKER, 2009). Sie lagen im Vergleich zum o.g. Winterweizenstroh um Faktor 5,5 höher.

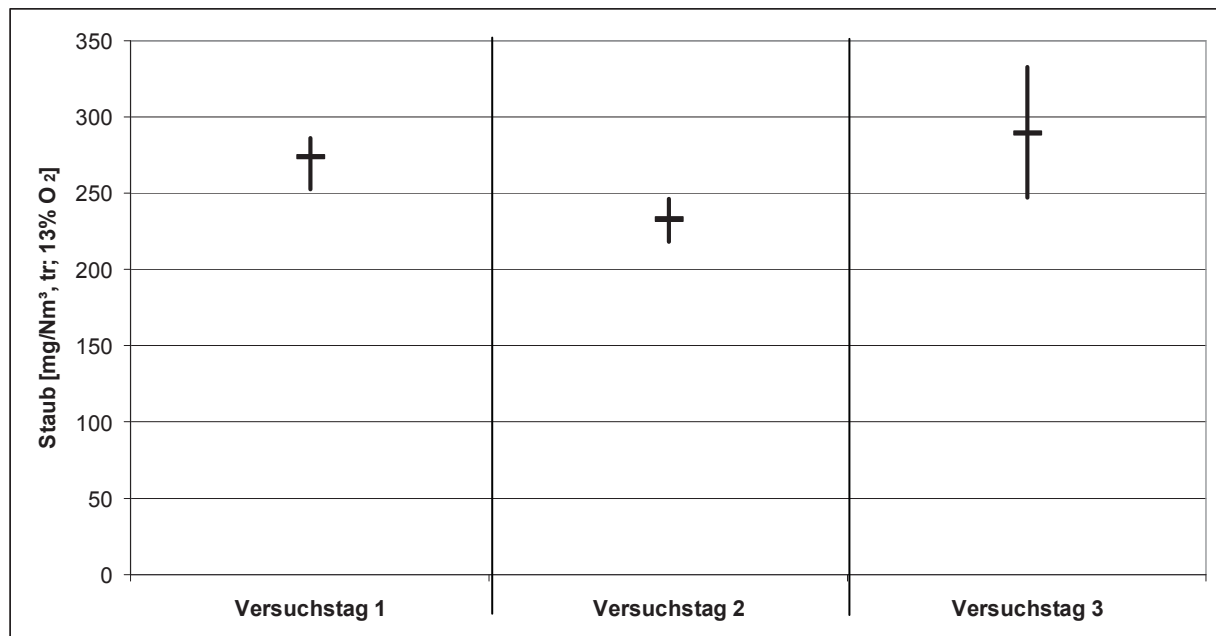


Abbildung 16: Gesamtstaubemissionen im Rohgas an 3 Versuchstagen (jeweils $n = 3$; bezogen auf 13 % Vol.-O₂ im trockenen Abgas unter Normbedingungen)

Mit diesen ermittelten Staubkonzentrationen wurden weder die für diese Anlage aktuell gültigen ($0,15\text{ g/Nm}^3$) noch die für Neuanlagen relevanten ($0,1\text{ g/Nm}^3$) bzw. zukünftigen Grenzwerte ($0,02\text{ g/Nm}^3$) für den Staubgehalt eingehalten (Kapitel 2.3, Tabelle 5).

4.6.2.3 Stickoxid

Der unter Optimierung des Ausbrandes (Minimierung der CO-Konzentrationen) ermittelte, durchschnittliche NO_x-Gehalt lag an allen 3 Versuchstagen, mit 590 mg/Nm^3 im Bereich der brennstoff- und anlagenspezifischen Erwartungen (Abbildung 17 und Kapitel 4.6.2.1, Abbildung 15).

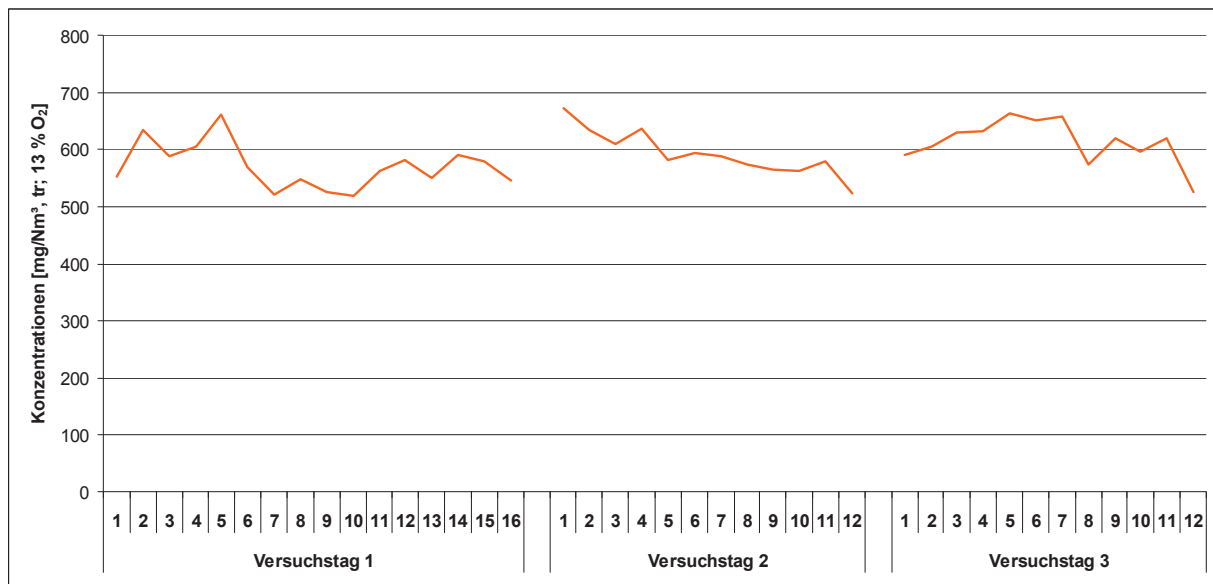


Abbildung 17: Verlauf der NO_x-Emissionen [mg/Nm³] an den drei Versuchstagen (¼ h-Werte bezogen auf 13 Vol.-% O₂ im trockenen Abgas unter Normbedingungen)

Der NO_x-Grenzwert liegt bei 500 mg/Nm³ (siehe Tabelle 5) und wird bei allen Messwerten in dem Praxisversuch der Heuverbrennung überschritten.

4.6.2.4 Sonstige Emissionen

Weitere Emissionsuntersuchungen wurden für die Emissionsparameter:

- Schwefeldioxid – SO₂
- Chlorwasserstoff – HCl
- Dioxine und Furane – PCDD/F
- Distickoxide – N₂O
- Ammoniak – NH₃

durchgeführt.

Für die im Projekt untersuchte, nicht genehmigungsbedürftige Anlage wurden diese Untersuchungen jedoch lediglich zur orientierenden Einordnung gemacht.

Die nachgewiesenen mittleren Emissionen für SO₂ (128 mg/Nm³) und HCl (28 mg/Nm³) erfüllen allgemeine Emissionsbegrenzungen der TA-Luft für Anlagen im Geltungsbereich der 4. BImSchV (Leistungsbereich größer 100 kW beim Einsatz von Halmgut) (Abbildung 18).

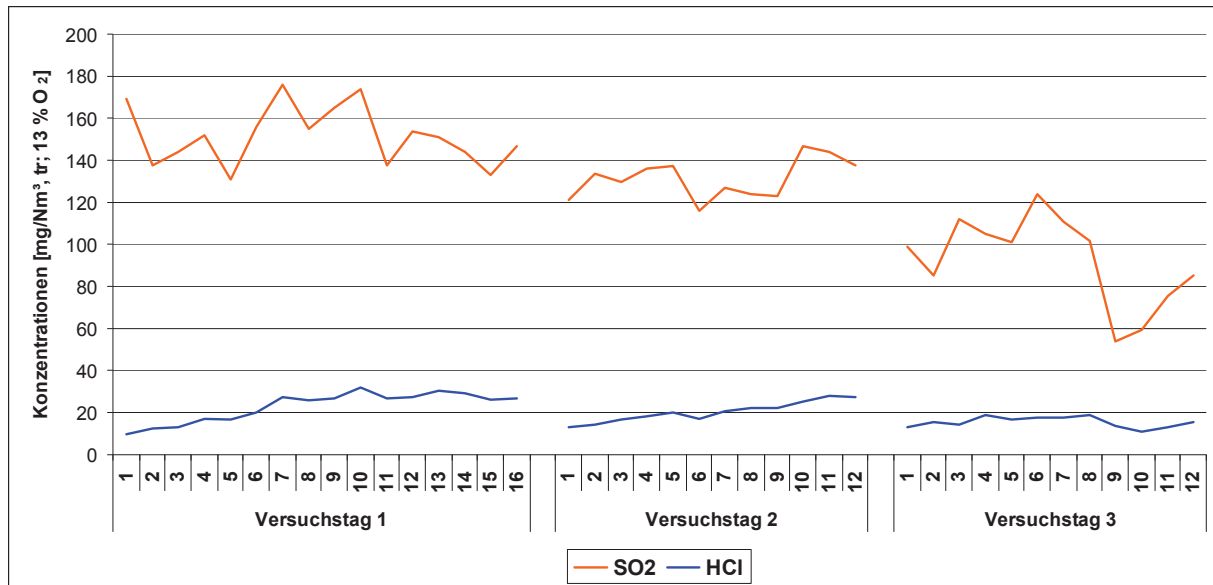


Abbildung 18: Verlauf der SO₂- und HCl-Emissionen [mg/Nm³] an den drei Versuchstagen (¼ h-Werte bezogen auf 13 Vol.-% O₂ im trockenen Abgas unter Normbedingungen)

Zwei der drei Beurteilungswerte für PCDD/F liegen oberhalb der Emissionsbegrenzung bei Typenpüfungen für Kleinfeuerungsanlagen nach 1. BImSchV, als auch der allgemeinen Werte der TA-Luft (0,1 ng/Nm³; bezogen auf 13 % bzw. 11 % Vol.-O₂).

Das eingesetzte Material in dem durchgeführten Versuch wies weder extrem hohe Chlorgehalte auf (Kapitel 4.6.1, Tabelle 29 im Vergleich zu Kapitel 2.4, Tabelle 7), noch konnte labor-technisch eine PCDD/F-Belastung im Ausgangsmaterial festgestellt werden, so dass die erhöhten PCDD/F-Emissionen im Abgas nicht auf das eingesetzte Versuchsmaterial zurückgeführt werden können.

4.7 Herstellungskosten der untersuchten Pflanzengesellschaften

Unter den in der Methodenbeschreibung (Kapitel 3.2.4) getroffenen Annahmen bzgl. Preise, Transportwege und Maschineneinsatz, wurden für alle Pflanzengesellschaften, Nutzungsvarianten und Aufwüchse die Biomasseherstellungskosten berechnet.

In Abbildung 19 sind diese Biomasseherstellungskosten der einzelnen Aufwüchse der jeweiligen Pflanzengesellschaften und Nutzungsvarianten pro Hektar dargestellt.

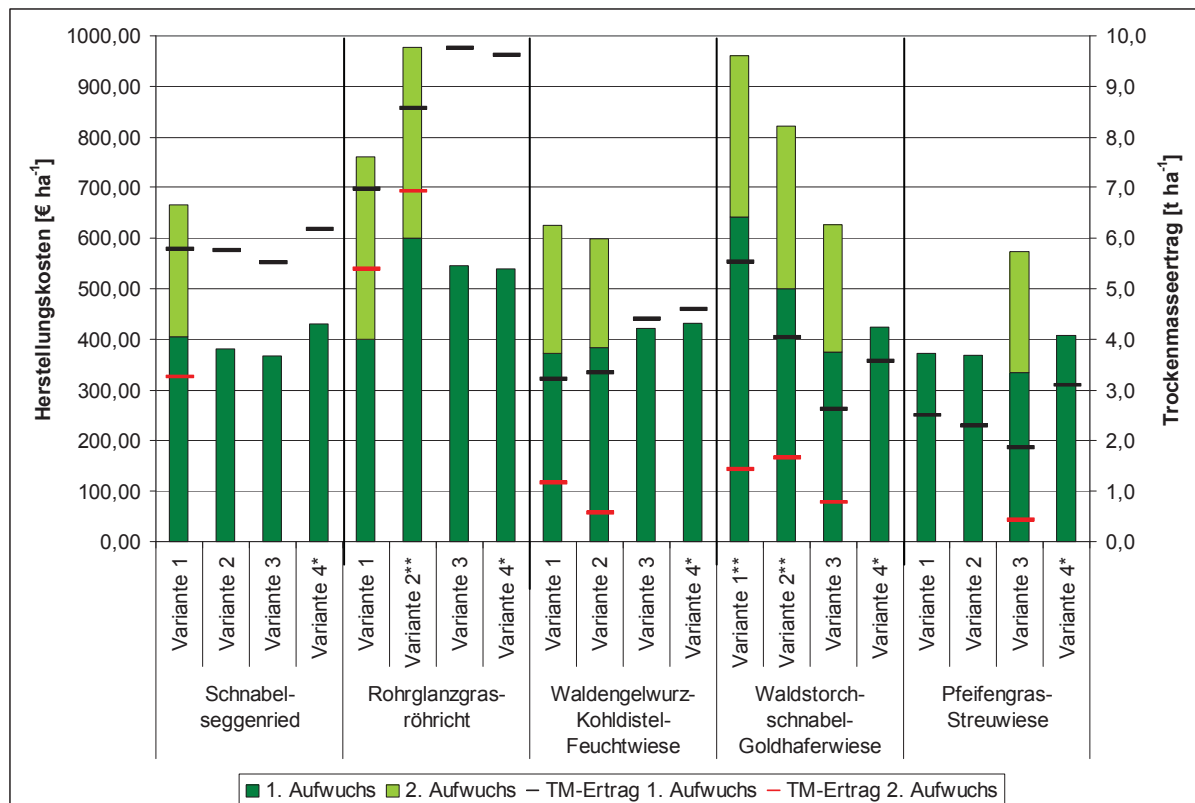


Abbildung 19: Herstellungskosten [€ ha⁻¹] der einzelnen Aufwüchse und deren Trockenmasseertrag [t ha⁻¹], wobei * Beerntung alle zwei Jahre ** gedüngte Varianten

Die höchsten Biomasseherstellungskosten bezogen auf einen Hektar hatten die zweischrittige PK-gedüngte Nutzungsvariante (Variante 2) des Rohrglanzgrasröhrichts und die NPK- vor der PK-gedüngten Nutzungsvariante (Varianten 1 und 2) der Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese. Dies kam durch den Einsatz von Düngemitteln und, im Fall des Rohrglanzgrasröhrichts, speziell durch die hohen Trockenmasseerträge, die es mit technischem Aufwand zu bewältigen gilt.

In Abbildung 20 sind die Biomasseherstellungskosten der einzelnen Aufwüchse sowie die Durchschnittskosten bezogen auf eine Tonne Trockenmasse dargestellt. Damit verschieben sich die Relationen.

Die niedrigsten Biomasseherstellungskosten, in Euro bezogen auf eine Tonne Trockenmasse, hatten die Nutzungsvarianten des Rohrglanzgrasröhrichts mit 78,52 € t⁻¹ bis 85,25 € t⁻¹, gefolgt von dem Schnabelseggenried mit Biomasseherstellungskosten zwischen 94,49 € t⁻¹ und 105,25 € t⁻¹ und der Kohldistelwiese mit Herstellungskosten zwischen 134,72 € t⁻¹ und 219,60 € t⁻¹. Die höchsten Biomasseherstellungskosten hatten die Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese mit 169,40 € t⁻¹ und 263,27 € t⁻¹ und die Pfeifengras-Streuwiese mit 159,81 € t⁻¹ und 356,97 € t⁻¹.

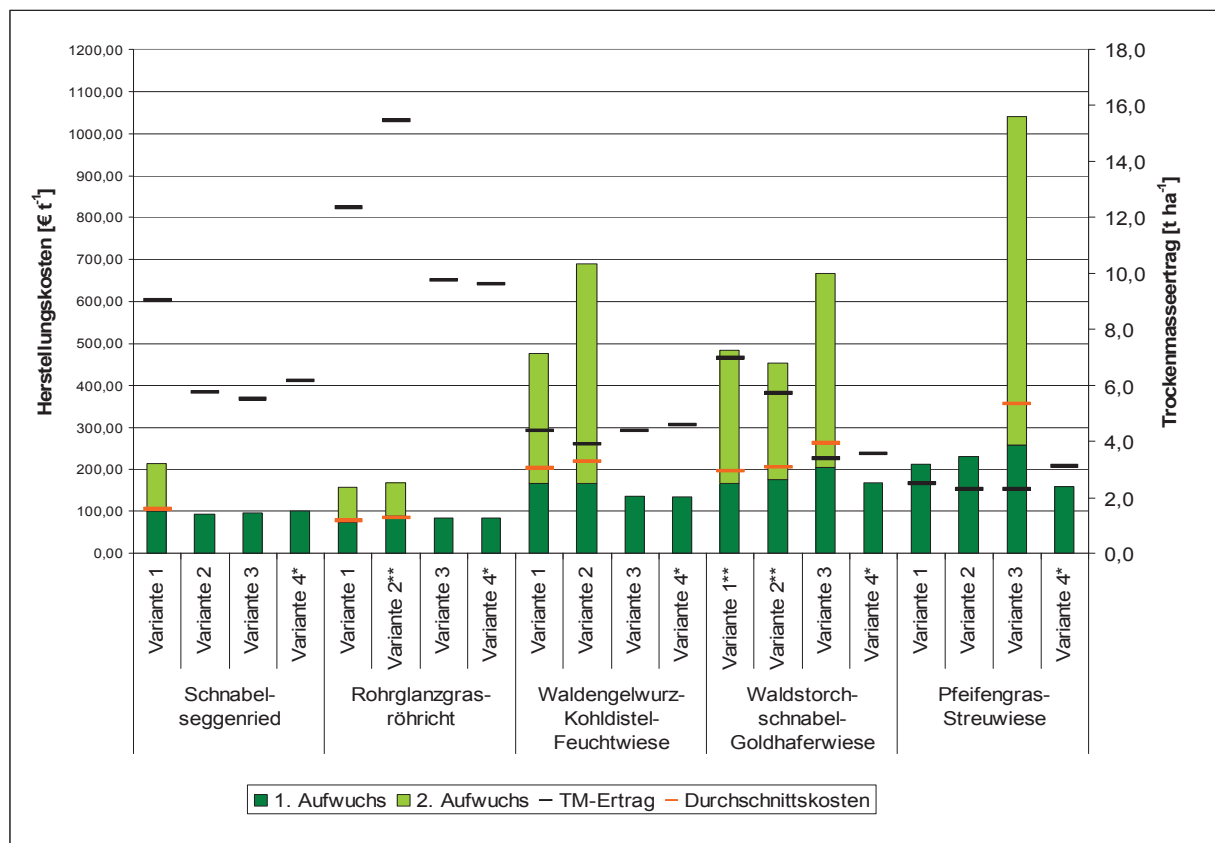


Abbildung 20: Herstellungskosten pro Tonne Trockenmasse [€ t⁻¹] der einzelnen Aufwüchse sowie die durchschnittlichen Bereitstellungskosten für die einzelne Variante und Trockenmasseertrag [t ha⁻¹], wobei * Beerntung alle zwei Jahre ** gedüngte Varianten

Die Biomasseherstellungskosten der in Kapitel 4.1 als „ertragsoptimiert“ identifizierten Nutzungsvarianten lagen zwischen 84,91 € t⁻¹ und 229,71 € t⁻¹ TM. Dabei hatte die zweischnittige K-gedüngte Nutzungsvariante des Rohrglanzgrasröhrch die niedrigsten Herstellungskosten pro t TM, gefolgt von der alle zwei Jahre geernteten und der zweischnittigen Nutzungsvariante des Schnabelseggenrieds (99,80 € t⁻¹ und 105,25 € t⁻¹ TM). Die einschnittige, Mitte August geerntete Nutzungsvariante der Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese hatte 137,08 € t⁻¹ TM Biomasseherstellungskosten. Mit 205,70 € t⁻¹ TM und 229,71 € t⁻¹ TM hatten die zweischnittige PK-gedüngte Nutzungsvariante der Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese sowie die einschnittige Mitte September geerntete Nutzungsvariante der Pfeifengras-Streuwiese die höchsten Biomasseherstellungskosten unter den Nutzungsvarianten mit den höchsten bzw. optimalen Erträgen.

In Tabelle 30 sind die Trockensubstanzgehalte der Nutzungsvarianten, die das Ertragspotenzial bzw. das Ertragsoptimum ausschöpften bzw. erreichten, dargestellt.

Tabelle 30: Durchschnittserträge der Versuchsjahre 2008 bis 2010 und die durchschnittlichen Trockensubstanzgehalte bei einer Gutfeuchte über 3 bei der Ernte

Dauergrünlandtyp	Variante	Aufwuchs	TS [% FM]	Gutfeuchte bei Ernte*
Schnabel- seggenried	1	1	36,6	feucht-frisch bis frisch
		2	36,2	feucht-frisch
	4	1	47,9	feucht-frisch
Rohrglanzgras- röhricht	2	1	28,6	frisch
		2	30,3	feucht-frisch
Waldengelwurz- Kohldistel- Feuchtwiese	3	1	21,7	tropfnass bis nass
Waldstorchschnabel- Goldhaferwiese	2	1	23,8	frisch bis tro- cken
		2	22,3	feucht-frisch bis frisch
Pfeifengras- Streuwiese	2	1	27,3	feucht bis feucht-frisch

* angestrebte Gutfeuchte zur Ernte: feucht bis trocken

Alle Nutzungsvarianten hatten TS-Gehalte, die ein weiteres Anwelken zur Bereitstellung lagerfähiger Biomasse unbedingt nötig machen. Die angestrebte Gutfeuchte zur Ernte von feucht bis trocken wurde von der Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese deutlich überschritten. Je feuchter die Biomasse zur Ernte ist, desto länger ist die Feldliegezeit bzw. desto öfter muss gewendet werden. Dies führt z.B. gegenüber zu Stroh zu deutlich höheren Biomasseherstellungskosten.

4.8 Biomassepotenzialschätzung und Szenarien der energetischen Verwertung am Beispiel von Modellregionen

4.8.1 Biomassepotenzial vom Grünland zur Energiegewinnung

Landkreis Havelland

Tabelle 31 zeigt die Ergebnisse der Ertragszuordnung auf Feldblockebene ohne Berücksichtigung der Ernte- und Lagerungsverluste. Knapp 60 % aller Grünlandflächen liegen im LK HVL auf Sanden bis Anmooren und auf Niedermooren und gehören zur Ertragskategorie II. Auf den ertragsarmen, sandigen und podsoligen Böden der Kategorie IV befinden sich dagegen weniger als 4 % des Grünlandes. Intensive Grünlandbewirtschaftung wird ebenso häufig auf Böden der Kategorien I und III betrieben, jedoch finden auf Böden der Kategorie I häufiger Extensivierungsmaßnahmen statt. Entsprechend der Flächenverteilung unterscheiden sich auch die jährlichen Erträge: der überwiegende Teil der Grünlandaufwüchse wird von Böden der Kategorie II geerntet. Insgesamt beläuft sich das Grünlandpotenzial auf 154 627,8 t TM a⁻¹, wobei 83 354 t TM a⁻¹ von extensiv bewirtschafteten und 71 273,8 t TM a⁻¹ von produktiven Flächen stammen.

Tabelle 31: Flächen- und Biomassepotenziale extensiv bewirtschafteter (ext. bew.) und produktiver (prod.) Grünlandflächen im Havelland, unterteilt nach Ertragskategorien

Kategorie	Standorte/Böden	Flächenpotenzial ha a ⁻¹		Biomassepotenzial t TM a ⁻¹	
		ext. bew.	prod.	ext. bew.	prod.
I	Böden aus Lehm/Schluff/Ton über (Auen)Sand Niedermoore aus Torf verbreitet über Lehm und Mudde	4.406	1.462	22 030	13 8.89
II	Sandböden mit Torfböden in holozänen Tälern Niedermoore aus Torf und aus Torf über Fluss- sand	12.109	5.115	48 436	43 477,3
III	Sandböden in pleistozänen und holozänen Tälern (Lehm)Sandböden über Lehm mit Sandböden Böden aus geringmächtigem Torf mit minerali- schen Böden	3.213	1.611	11 245,5	12 082,5
IV	podsolige Braunerden und podsolige Gley- Braunerden Sandböden mit Sandböden über Lehm Sandböden in pleistozänen Tälern mit Flug- sandböden	657	365	1 642,5	1 825
Gesamt:		20.384	8.553	83 354	71 273,8

Die Berechnung des Grünlandbedarfs der landwirtschaftlichen Tierhaltung und der Biogasanlagen unter Berücksichtigung der Ernte- und Lagerungsverluste ergab:

Grassilage für Tierfütterung	45 086,6 t TM a ⁻¹
Grassilage für Biogasanlagen	11 771,8 t TM a ⁻¹
Heu für Tierfütterung	40 629,7 t TM a ⁻¹
Weide für Tierfütterung	31 302,7 t TM a ⁻¹
Gesamtbedarf an Grünlandbiomasse	128 790,8 t TM a ⁻¹

Diese Mengen entsprechen dem jährlichen Futter- und Rohstoffbedarf im LK HVL, wobei die jeweiligen Ernte- und Lagerungsverluste nach oben korrigiert wurden. Somit ergibt sich ein jährliches Biomassepotenzial für die energetische Nutzung vom Dauergrünland in Höhe von 25 837 t TM, der von extensiv genutzten Grünlandflächen stammt. Infolge der bei der Heuwerbung entstehenden Verluste in Höhe von 30 % reduziert sich das energetisch nutzbare Biomassepotenzial vom Dauergrünland auf 18 086 t TM a⁻¹ (11,7 %).

Die räumliche Verteilung dieses Biomassepotenzials innerhalb der Landkreise ist in Abbildung 21 dargestellt.

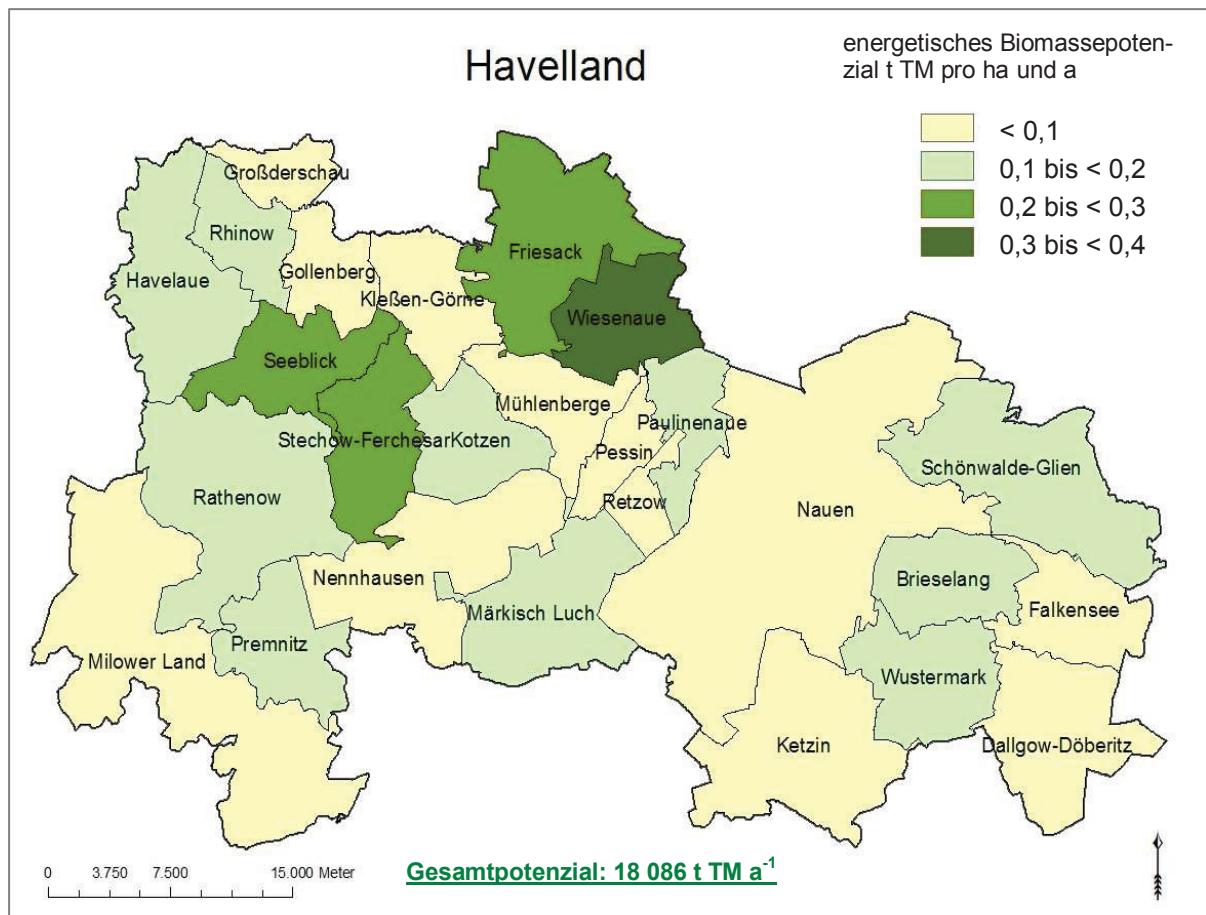


Abbildung 21: Räumliche Verteilung des Biomassepotenzials vom Dauergrünland für die Verbrennung in der Modellregion Havelland

Das höchste Biomassepotential in Höhe von 0,36 t TM pro Hektar Gemeindefläche und Jahr, das für die energetische Verwertung zur Verfügung stehen würde, hat die Gemeinde Wiesenaue. Knapp die Hälfte der betrachteten Gemeinden weist jedoch ein eher geringes Biomassepotenzial vom Dauergrünland von unter 0,1 t TM ha⁻¹ a⁻¹ auf. Die Abbildung macht deutlich, dass sich das Biomassepotenzial mengenmäßig auf den nordwestlichen Teil der Modellregion konzentriert.

Landkreis Saalfeld-Rudolstadt

Der Ausgangspunkt für die Potenzialermittlung des Grünlandes im LK SLF war im Gegensatz zum LK HVL (BÜK 300, Kapitel 3.2.5.2) die freiverfügbare Biotoptypen- und Nutzungstypenkartierung.

Aus Tabelle 32 ist ersichtlich, dass große Unterschiede in den berechneten Flächengrößen zwischen dieser getesteten Methode des ATB und den nach nur TLL intern verfügbaren einzelflächenbezogenen Zahlen existieren.

Tabelle 32: Flächen- und Grünlandpotenziale in Saalfeld-Rudolstadt, unterteilt nach Ertragskategorien und verschiedenen Erhebungs-/Berechnungsmethoden

Kategorie	Grünlandtyp	Vegetationstyp	nach Methodenbeschreibung ATB			Kontrollzahlen TLL
			Fläche ha a ⁻¹	Potenzial t TM a ⁻¹		Summe einzelflächenbezogener, nicht öffentlicher Daten (ha a ⁻¹)
				Heu	Silage	
I	Bergwiesen	Goldhaferwiese	1 764	1 984,5	7 673,5	2 537* 2 212**
II	Tal-/Vorgebirgswiesen	Wiesenfuchsschwanzwiese	1 571	1 413,7	8 796,2	4 933
III	Produktives Grünland	Weidelgras-Weißklee-Weide	5 264	1 710,6	39 002,9	2 362
IV	Feuchtgebiete, Feuchtwiese, Auen	Kohldistelwiese	421	2 001,5	158,0	739
V	Trockener Standort auf Sand-/Zechstein	Mähweide (trockenes/mageres GL in ext. Nutzung, inkl. junger Brachestadien)	261	274,4	764,3	450
VI	Trockener Standort auf Muschelkalk	Möhren-Glatthaferwiese	18	19,1	81,7	1 534
VII	unterschiedlich	unterschiedlich	5 468	5 559,7	32 123,2	
...Gesamt			14 767	12 963,5	88 599,8	14 767

* produktive Standorte

** extensive Standorte

Diese Differenz macht deutlich, dass mit dem gewählten Modell keine plausiblen Ergebnisse für das energetisch nutzbare Biomassepotenzial vom Dauergrünland berechnet werden kann.

Daher beschränken sich die folgenden Ausführungen auf den Landkreis Havelland.

4.8.2 Dezentrale Verbrennung zur alleinigen thermischen Nutzung

Beim Konzept der dezentralen Verbrennung wurde von dem jeweiligen energetisch nutzbaren Biomassepotenzial vom Dauergrünland in den Gemeinden ausgegangen.

Für den LK HVL (Tabelle 33) liegt die Leistung der modellierten Heizwerke zwischen 116 kW (Gollenberg, aufgrund eines geringen nutzbaren Biomassepotenzials) und 317 kW (Kleßen-Görne). Die meisten Wohngebäude können in Friesack beheizt und mit Warmwasser versorgt werden.

Tabelle 33: Energetisch nutzbares Biomassepotenzial vom Dauergrünland, Leistung der Biomassekessel und Anzahl beheizter Häuser auf Gemeindeebene im Havelland

Gemeinde	energetisch nutzbares Biomassepotenzial t TM a ⁻¹ a)	Leistung der Heizwerke ^{b)}		Anzahl der Heizwerke	Anzahl angeschlossener Häuser	
		pro Gemeinde	einzelnen		pro Heizwerk	pro Gemeinde
Brieselang	524	1 521	304	5	30	150
Dallgow-Döberitz	164	476	238	2	24	48
Falkensee	391	1 134	283	4	28	112
Friesack	1 795	5 205	306	17	31	527
Gollenberg	40	116	116	1	11	11
Großderschau	142	413	206	2	20	40
Havelaue	1 043 (925)	2 684	298	9	30	270
Ketzin	497	1 442	288	5	29	145
Kleßen-Görne	328	951	317	3	32	96
Kotzen	479	1 391	278	5	28	140
Milower Land	1 051	3 050	305	10	31	310
Mühlenberg	210	609	305	2	30	60
Märkisch-Luch	805	2 336	292	8	29	232
Nauen	638	1 850	308	6	31	186
Nennhausen	821	2 381	298	8	30	240
Paulinenaue	491	1 425	285	5	28	140
Pessin	70	203	203	1	20	20
Premnitz	846	2 453	307	8	31	248
Rathenow	1 202	3 486	291	12	29	348
Retzow	140	406	203	2	20	40
Rhinow	378	1 097	274	4	27	108
Schönwalde-Glien	1 411	4 093	292	14	29	406
Seeblick	986 (889)	2 578	286	9	29	261
Stechow-Ferchesar	1 426 (880)	2 554	284	9	28	252
Wiesenu	1 662 (739)	2 143	306	7	31	217
Wustermark	544	1 578	263	6	26	156
Gesamt	18 086 (16 402)	47 578		164		4 763

a) in Klammern ist der reduzierte, an den Wärmebedarf der Gemeinde angepasste Rohstoffinput^{b)} aus gleichen Mengen Heu und Holz

Für jede Gemeinde wurde eine Wirtschaftlichkeitsbewertung durchgeführt. Da sich die konzipierten Heizwerke lediglich in ihrer Leistung unterscheiden, wird hier von einer Rentabilitätsdarstellung für alle Gemeinden abgesehen. Stattdessen werden zwei ausgewählte Heizwerke detailliert betrachtet, deren Vergleich ökonomische Schlüsse zulässt (Tabelle 34). Die beiden Biomasseheizwerke in Gollenberg und in Kleßen-Görne stellen jeweils das kleinste

und das größte Heizwerk für den LK HVL dar und erlauben, die Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit der Anlagengröße zu bewerten.

Tabelle 34: Wirtschaftlichkeitsvergleich ausgewählter dezentraler Heizwerke im Havelland

Parameter\Gemeinde	Einheit	Gollenberg (HVL)	Kleßen-Görne (HVL)
Leistung des Heizwerkes	kW	116	317
Heueinsatz	t TM a ⁻¹	40	109
Heukosten	€ t TM ⁻¹	46	46
Anzahl angeschlossener Häuser	Stück	11	32
Länge des Wärmenetzes	m	400	925
Verkaufte Wärmemenge	kWh a ⁻¹	282 086	770 600
Investitionskosten, davon	€	151 355	384 859
Wärmenetz, -verteilung	€	49 200	121 650
Heizwerk	€	102 155	263 209
Investitionskosten	€ kW ⁻¹	1 304	1 214
Jährliche Kosten, davon	€ a ⁻¹		
Annuitäten	€ a ⁻¹	28 337	70 086
Reparaturen/Wartung	€ a ⁻¹	12 243	31 213
Betriebsmittel, Ascheentsorgung	€ a ⁻¹	2 024	5 165
Versicherung, Sonstiges	€ a ⁻¹	1 514	3 849
Lohnkosten	€ a ⁻¹	3 027	7 697
Rohstoffkosten	€ a ⁻¹	3 294	5 130
	€ a ⁻¹	6 235	17 032
Jährliche Erlöse	€ a ⁻¹	16 925	46 236
Verlust	€ a ⁻¹	-11 412	-23 850
Wärmegestehungskosten	€ kWh ⁻¹	0,10	0,09

Von allen modellierten Heizwerken hat das kleinste Heizwerk in der Gemeinde Gollenberg (HVL) mit 1 304 € kW⁻¹ die höchsten Investitionskosten. Dies lässt sich durch die höheren Anschaffungspreise für kleine Kessel erklären.

Einen hohen Einfluss auf die jährlichen Kosten haben auch die Rohstoffkosten. Bei einem als konstant angenommenen Holzhackschnitzelpreis von 110 € t⁻¹ TM ist der Heupreis ausschlaggebend.

Die dezentrale Verbrennung von Biomasse kann im hier angenommenen Szenario keinen wirtschaftlichen Erfolg erzielen.

Nicht nur die zwei dargestellten Anlagen, sondern alle betrachteten Heizwerke in der Modellregion würden Verluste erwirtschaften. Aussagekräftig für die Rentabilität der Heizwerke sind die Wärmegestehungskosten. Sie belaufen sich in allen Gemeinden auf 0,09 bis 0,10 € kWh⁻¹. Um den wirtschaftlichen Betrieb eines Biomasse-Heizwerks zu gewährleisten, müssen die Wärmegestehungskosten unter dem Wärmeverkaufspreis liegen.

4.8.3 Zentrale Verbrennung zur kombinierten Wärme- und Stromerzeugung

Für die zentrale Verbrennung von Biomasse muss der ausgewählte Standort eine hohe Wärmenachfrage aufweisen und zudem in der Nähe von Gemeinden mit einem hohen energetisch nutzbaren Biomassepotenzial vom Dauergrünland liegen. Im LK HVL entsprechen zwei Standorte diesen Anforderungen: das Gebiet um die Stadt Rathenow im östlichen Teil sowie das Dreieck zwischen den Gemeinden Nauen, Schönwalde-Glien und Brieselang im westlichen Teil des Landkreises. Die Charakteristika und die Wirtschaftlichkeit der modellierten Biomasseheizkraftwerke sind in Tabelle 35 dargestellt.

Tabelle 35: Wirtschaftlichkeit der zentralen Biomasse-Heizkraftwerke im Havelland

Standort des Heizkraftwerkes	Einheit	Rathenow	Nauen
Einbezogene Gemeinden		Rathenow, Havelaue, Seeblick, Stechow-Ferchesar, Kotzen, Nennhausen, Premnitz, Milower Land	Nauen, Schönwalde-Glien, Brieselang, Falkensee, Wustermark, Dallgow-Döberitz
Gesamtes energetisch nutzbares Biomassepotenzial vom Dauergrünland	t TM a ⁻¹	7 855	3 672
Leistung	kW _{el} kW _{th}	4 189 6 982	1 959 3 264
Anzahl angeschlossener Häuser	Stück	581	272
Länge des Wärmenetzes	m	9 700	5 065
Eingespeiste Strommenge	kWh _{el} a ⁻¹	23 041 300	10 772 500
Verkaufte Wärmemenge ^{a)}	kWh _{th} a ⁻¹	29 550 500	13 815 700
Investitionskosten, davon	€	23 133 980	10 943 440
Wärmenetz, -verteilung	€	3 025 200	1 542 000
Heizkraftwerk	€	20 108 780	9 401 440
Jährliche Kosten, davon	€ a ⁻¹	4 736 405	2 238 206
Annuitäten	€ a ⁻¹	1 976 814	932 521
Reparaturen/Wartung	€ a ⁻¹	331 884	156 442
Betriebsmittel, Ascheentsorgung	€ a ⁻¹	231 340	109 434
Versicherung, Sonstiges	€ a ⁻¹	462 679	218 869
Lohnkosten	€ a ⁻¹	320 000	160 000
Stromkosten	€ a ⁻¹	78 340	36 626
Rohstoffkosten	€ a ⁻¹	1 335 348	624 314
Jährliche Erlöse, davon	€ a ⁻¹	5 066 460	2 487 055
Grundvergütung (EEG)	€ a ⁻¹	1 935 070	943 035
NawaRo-Bonus (EEG)	€ a ⁻¹	714 819	412 202
KWK-Bonus (EEG)	€ a ⁻¹	643 544	300 875
Wärmeverkauf ^{a)}	€ a ⁻¹	1 773 028	828 942
Gewinn	€ a ⁻¹	330 055	248 849
Durchschnittliche EEG-Vergütung (ohne KWK-Bonus)	€ kWh _{el} ⁻¹	0,12	0,13
Stromgestehungskosten	€ kWh _{el} ⁻¹	0,17	0,18

^{a)} bei 95 % Wärmeverkauf

Das gesamte energetisch nutzbare Biomassepotenzial vom Dauergrünland der einbezogenen Gemeinden wurde als Substratinput für die Verbrennungsanlage angenommen. Der Heupreis frei Anlage beläuft sich auf 60 € t⁻¹ TM im LK HVL. Der Holzhackschnitzelpreis beträgt einheitlich 110 € t⁻¹ TM. Genau wie bei der dezentralen Verbrennung stehen die Annuitätszahlungen, gefolgt von den Rohstoffkosten bei den jährlichen Kosten an erster Stelle.

Ein wirtschaftlicher Betrieb von Biomasse-Heizkraftwerken ist ohne Zuschüsse nicht möglich. Die Vergütungen des EEG machen den größten Teil der Erlöse aus. Die alleinige Wärmenutzung kann auch in großen Biomasseanlagen die entstehenden Kosten nicht decken. Eine ökonomisch erfolgreiche Biomasseverbrennung bedarf daher sowohl der subventionierten Stromproduktion, als auch des Wärmeverkaufs. Dies geht aus dem Vergleich der gewährten EEG-Vergütungen (Gründvergütung, NawaRo-Bonus) von 0,11 bis 0,13 € kWh_{el}⁻¹ stehen die Stromgestehungskosten von 0,17 bis 0,19 € kWh_{el}⁻¹ gegenüber. Damit die zentrale Verbrennung rentabel wird, müssen sich demzufolge die Erlöse aus der Wärmenutzung (KWK-Bonus, Wärmeverkauf) auf mindestens 0,05 bis 0,07 € kWh_{el}⁻¹ belaufen. Der Anteil genutzter Wärme sollte also möglichst hoch sein. In den betrachteten Varianten wird von 95 % ausgegangen. Die Wärmenutzung einer KWK-Biomasseanlage verdient somit besonders hohe Aufmerksamkeit. Auch geringe Änderungen im Wärmeverkauf können die wirtschaftliche Bilanz eines Heizkraftwerkes entscheidend beeinflussen.

4.8.4 Dezentrale Biogasgewinnung als Alternativverwertung

Dem dezentralen Konzept der Biogasgewinnung liegen vier verschiedene Verfahren zugrunde. Anhand der berechneten energetisch nutzbaren Biomassepotenziale vom Dauergrünland und anfallenden Mengen an Wirtschaftsdünger, wurden mögliche Standorte für Biogasanlagen identifiziert. In der Modellregion Havelland kommen alle vier Verfahren der Biogaserzeugung zur Anwendung (Tabelle 36).

Tabelle 36: Mögliche Standorte, Leistung und eingesetzte Substrate der Biogasanlagen

Gemeinde	Gras-silage, t FM a ⁻¹	Rinder-gülle, t FM a ⁻¹	Rinder-stallmist, t FM a ⁻¹	Schweine-gülle, t FM a ⁻¹	Installierte Leistung, kW _{el}	Ver-fahren
Landkreis Havelland (HVL)						
Friesack	5 860	20 265	9 864	0	701	NF
Nennhausen	2 681	9 885	7 309	0	390	NF
Havelaue	3 407	28 520	15 807	4 934	872	NFE
Kleßen-Görne	1 071	6 984	3 557	0	230	NFE
Milower Land	3 433	22 266	11 509	0	665	NFE
Rathenow	3 924	0	1 072	0	247	MA
Seeblick	3 221	0	1 301	0	218	MA
Stechow-Ferchesar	4 657	0	60	0	249	MA
Wiesenau	5 426	3 755	1 615	0	337	MA
Schönwalde-Glien	4 608	0	3 772	0	329	MA
Märkisch Luch	2 630	0	3 577	0	233	FSF
Nauen	2 083	0	12 741	0	428	FSF
Paulinenaue	1 604	0	4 362	0	210	FSF

NF – Nassfermentation, NFE – Nassfermentation mit Enzymeinsatz, MA – Nassfermentation mit mechanischer Aufbereitung, FSF – Feststofffermentation, BGA – Biogasanlage

Die installierte Leistung der BHKW beläuft sich auf 210 bis 872 kW_{el} im LK HVL. Im Land Brandenburg gilt ein Biomasseerlass, der das Errichten auch leistungsstärkerer Bioenergieanlagen in land- und forstwirtschaftlichen Betrieben zulässt (N.N., 2006). In den übrigen Bundesländern ist der Anlagenbau größer 500 kW_{el} aufgrund des Planfeststellungsverfahrens und der damit verbundenen Sachverhalte, wie der Beteiligung durch das Vorhaben betroffener Bürger und Behörden, erschwert. Die Wirtschaftlichkeit ausgewählter Biogasanlagen, anhand der eingesetzten Substratmengen (Tabelle 36) ist in Tabelle 37 für die Modellregion Havelland dargestellt.

Tabelle 37: Wirtschaftlichkeit ausgewählter Biogasanlagen im Havelland

Gemeinde	Einheit	Nenn- hausen	Kleßen- Görne	Rathe- now	Wiesen- aue	Märkisch Luch
Verfahren		NF	NFE	MA	MA	FSF
Leistung	kW _{el}	390	230	247	337	233
	kW _{th}	405	238	256	350	241
Motortyp		GM	ZS	ZS	GM	ZS
Spezifische Investitions- kosten	€ kW _{el} ⁻¹ € m ⁻³	4 400	4 800	5 500	5 500	1 000
Gesamtinvestition	€	1 715 999	1 102 424	1 356 436	1 853 302	1 219 232
Jährliche Kosten, darun- ter	€ a ⁻¹	452 938	317 758	320 188	399 880	293 135
Annuitätszahlungen	€ a ⁻¹	165 323	106 210	130 682	178 551	117 464
Substratkosten	€ a ⁻¹	129 637	71 818	28 378	57 465	47 605
Jährliche Erlöse, davon	€ a ⁻¹	591 201	377 208	378 772	568 452	381 557
Grundvergütung (EEG)	€ a ⁻¹	287 264	182 353	193 446	252 560	184 486
NawaRo-Bonus (EEG)	€ a ⁻¹	194 574	114 585	123 043	168 114	116 211
Gülle-Bonus (EEG)	€ a ⁻¹	66 435	55 007	0	62 654	55 239
LaPf-Bonus (EEG)	€ a ⁻¹	0	0	35 155	48 033	0
KWK-Bonus (EEG)	€ a ⁻¹	20 847	12 277	13 183	18 012	12 451
Wärmeverkauf	€ a ⁻¹	22 081	12 986	13 944	19 078	13 170
Gewinn	€ a ⁻¹	138 264	59 450	58 584	168 572	88.421
Durchschnittliche EEG- Vergütung ^{a)}	€ kWh _{el} ⁻¹	0,19	0,21	0,20	0,22	0,21
Stromgestehungskosten	€ kWh _{el} ⁻¹	0,16	0,19	0,18	0,16	0,17

GM – Gasmotor, ZS – Zündstrahlmotor, LaPf-Bonus – Landschaftspflege-Bonus

^{a)} ohne KWK-Bonus

Der größte Anteil der jährlichen Anlagenkosten wird durch Zins- und Tilgungszahlungen verursacht. Die Substratkosten bilden ebenfalls einen bedeutenden Kostenanteil, deren Höhe aber von der Menge und dem Preis der eingesetzten Substrate abhängt. Die Einsatzkosten für Wirtschaftsdünger wurden mit 4,50 € t⁻¹ FM für Gülle und 10,00 € t⁻¹ FM für Stallmist veranschlagt. Die Bereitstellungskosten für Grassilage frei Biogasanlage betragen einheitlich 4,50 € t⁻¹ FM für den LK HVL. Das teuerste Substrat ist somit Stallmist im LK HVL.

Der Energiegehalt der verwendeten Substrate ist ebenfalls von Bedeutung. Im LK HVL erscheint hierbei der Vergleich der zwei Anlagen in Kleßen-Görne und Märkisch Luch interes-

sant. In beiden werden die gleichen Festmismengen in die Fermenter eingebracht. Die Nassfermentationsanlage in Kleßen-Görne erfordert jedoch zusätzlich hohe Mengen an Rindergülle, um die gleiche BHKW-Leistung zu erreichen wie die Feststofffermentationsanlage in Märkisch Luch. Grassilage erbringt höhere Gasausbeuten pro Tonne Frischmasse als Rindergülle. Demgemäß sind die jährlichen Substratkosten in Märkisch Luch niedriger, obwohl die Bereitstellungskosten von Grassilage und Rindergülle im LK HVL gleich hoch sind.

Die Stromgestehungskosten liegen für Biogasanlagen im LK HVL unter den gewährten EEG-Vergütungen, wodurch eine wirtschaftliche Biogasproduktion ermöglicht wird. Der angenommene 25 %-ige Wärmeverkauf bringt zusätzliche Erlöse. Alle modellierten Biogasanlagen im LK HVL sind rentabel, wobei der Gewinn zwischen $52\,875\text{ € a}^{-1}$ (Seeblick) und $192\,590\text{ € a}^{-1}$ (Milower Land) beträgt.

5 Diskussion

Ziel der Untersuchungen war die Optimierung der nachhaltigen Biomassebereitstellung von ausgewählten Dauergrünlandtypen für die thermische Verwertung. Hierfür wurden Grünlandtypen mit einem besonderen naturschutzfachlichen Wert auf typischen Standorten ausgewählt, die für ihre Erhaltung einer gezielten Biotoppflege bedürfen. Die Verwertung der dabei anfallenden Biomasse über den Wiederkäuer ist unter den heutigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen problematisch bzw. nur sehr eingeschränkt möglich und die Biomasse steht zumindest von den Wiesen zunehmend für eine alternative Verwendung zur Verfügung. Auf Grund des erforderlichen Spätschnittes fällt Halmgut mit sehr schlechter Siliereignung an und deshalb sollte mit der vorliegenden Arbeit die Verbrennungseignung, der aus der gezielten Biotoppflege anfallenden Biomasse, untersucht werden. Die Verbrennungseignung muss bei diesen naturschutzfachlich wertvollen Pflanzengesellschaften im Kontext ihrer Erhaltung wie auch der ökonomischen Umsetzbarkeit ihrer Bewirtschaftung stehen.

Die zweckmäßigsten Nutzungsvarianten für die untersuchten Dauergrünlandtypen müssen vordergründig einen guten Erhaltungszustand der Dauergrünland-Pflanzengesellschaften bei gleichzeitiger ertragreicher Ausnutzung des Standortpotenzials sicherstellen. Bei der Verbrennung der dabei anfallenden Biomasse sollten die Emissionen möglichst gering, die Ascheerweichungstemperatur möglichst hoch und die Schwermetallgehalte in den Aschen möglichst niedrig sein. Für die ökonomische Gestaltung der Pflegevarianten war die Erreichung optimaler Erträge für die kostengünstige Bereitstellung des Brennstoffs entscheidend.

Erhaltungszustand und Ertragspotenzial

Eingehend auf die bereits zur besseren Übersicht und Darstellung in Kapitel 4.1 identifizierten ertragreichsten Nutzungsvarianten, anhand der am jeweiligen Standort, mit der dort typischen Pflanzengesellschaft, maximal zu erzielenden Trockenmasseertragsleistung, werden diese nun in einem zweiten Schritt mit den Nutzungsvarianten verbunden, die die Mindestpflege zur Erhaltung dieser jeweiligen Pflanzengesellschaft gewährleisten. Die erforderliche Mindestpflege zur Erhaltung der untersuchten Pflanzengesellschaften bei gleichzeitiger Berücksichtigung des standörtlichen Ertragspotenzials ist unterschiedlich.

- Schnabelseggenried (Großseggenried)
Zweischnittnutzung zur nachhaltigen Ausschöpfung des Ertragspotenzials (Variante 1). Herbstmahd alle zwei Jahre ist ausreichend, um den erwarteten Zustand weitestgehend zu erhalten (Variante 4).
- Rohrglanzgrasröhricht
Zweischnittnutzung und Kaliumdüngung gewährleisten Nachhaltigkeit bei höchstem Ertrag (Variante 2), Herbstmahd jährlich (Variante 3) ist aus ökonomischer Sicht eine Alternative (Herstellungskosten).
- Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese
Jährlich einmalige Nutzung im Sommer gewährleistet ausgewogene Zusammensetzung des Pflanzenbestandes (Variante 3); Herbstmahd alle zwei Jahre ist auf sickerwasserreichem Standort ausreichend (Variante 4).
- Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese
Zweischnittnutzung und Grunddüngung mit P und vor allem K ist für die Erhaltung des produktiven Typs erforderlich (Variante 2). Für den Magerwiesentyp ist die ungedüngte Zweischnittnutzung das zielführende Nutzungssystem (Variante 3).
- Pfeifengras-Streuwiese
Alljährliche Herbstmahd gewährleistet eine ausgewogene Bestandeszusammensetzung (Variante 2).

Im dreijährigen Versuchszeitraum zeigten sich meist nur tendenzielle Veränderungen in den Pflanzenbeständen, weil die Untersuchungsdauer für diese stabilen Dauergrünlandbestände mit drei Jahren nicht ausreichend war.

Verbrennungseignung

Die Verbrennungseignung ergibt sich in erster Linie aus den Emissionen, da sich diese nur mit finanziell hohem Aufwand technisch reduzieren lassen. Verbrennungstechnisch war es im Praxisversuch mit einer optimierten Einstellung der Anlage (CO-Minimierung) mit dem eingesetzten Brennstoff von einer Glatthaferwiese möglich, den CO-Grenzwert der 1. BImSchV einzuhalten. Temporäre Emissionsspitzen lassen sich auf die Diskontinuität bei der Brennstoffbeschickung zurück führen.

Bei NO_x konnte der Emissionsgrenzwert, selbst bei einem für Futter relativ niedrigen Rohproteingehalt von 9,4 % in der Biomasse (entspricht 1,51 % N i. d. TM), nicht eingehalten werden. Die Aufwüchse der oben beschriebenen zweckmäßigsten Nutzungsvarianten beim Schnabelseggenried, Rohrglanzgrasröhricht und der Pfeifengras-Streuwiese stellen sich aufgrund niedrigerer Stickstoffgehalte weniger problematisch dar, liegen aber in ihren Gehalten dennoch alle höher als Stroh. Die Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese und die Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese enthielten sogar noch höhere N-Gehalte als die Glatthaferwiese.

Beim Praxisverbrennungsversuch zeigte sich, dass die SO₂-Emissionsgrenzwerte, bei einem Schwefelgehalt von 0,1 % i.d.TM im Versuchsbrennstoff, deutlich unterschritten wurden. Bei allen untersuchten Pflanzengesellschaften lagen die Schwefelgehalte z.T. deutlich über dem der Glatthaferwiese, sodass bei der Verbrennung höhere SO₂-Emissionen zu erwarten sind. Auch der HCl-Emissionsgrenzwert ist im Praxisversuch, bei einem Chlorgehalt von 0,11 % i. d. TM des Brenngutes, deutlich unterschritten wurden. Die in den Feldversuch einbezoge-

nen Pflanzengesellschaften wiesen dagegen deutlich höhere Cl-Gehalte in der Biomasse auf, bewegten sich jedoch mehrheitlich im Bereich von Stroh.

Ein Zusammenhang zwischen der Verbrennungsqualität bzw. dem erhöhten Staubgehalt im Abgas zu höheren PCDD/F-Emissionen konnte aufgrund des geringen Stichprobenumfanges sowie der Messung an dieser Praxisanlage nicht hergestellt werden. Frühere Messungen mit Stroh an dieser Anlage zeigten keine erhöhten PCDD/F-Konzentrationen im Abgas.

Es wird vermutet, dass chlorhaltige Einlagerungen in den Aschen der Rauchgaskanäle aus vorherigen, nicht in ihrer Qualität nachvollziehbaren Verbrennungsvorgängen (evtl. Phasen unvollständigen Ausbrandes bzw. Verbrennung von stark chlorhaltigen Brennstoffen) Ursachen für die Feststellung erhöhter PCDD/F Konzentrationen sein könnten.

Die Gesamtstaubemission erwies sich infolge der hohen Summe der Aerosolbildner als besonderes Problem. Die Elemente Kalium, Chlor und Schwefel sind wesentliche Aerosolbildner (HERING UND PEISKER, 2009) und machen bereits in ihrer Summe einen Anteil von bis zu 99,2 % an der Summe der gesamten Aerosolbildner in den als ertraglich und ökologisch optimiert identifizierten Nutzungsvarianten der Pflanzengesellschaften aus (Tabelle 38). Zudem sind sie an Korrosionserscheinungen beteiligt (KARL ET AL., 2003).

Tabelle 38: Summe der Elemente Stickstoff, Chlor, Kalium und Schwefel sowie der Anteil der Summe von Chlor, Kalium und Schwefel an der Summe der Aerosolbildner

Standort/ Pflanzengesellschaft	Variante	Anzahl	Σ Stickstoff, Chlor, Kali- um und Schwefel % TM	Anteil Chlor, Kali- um Schwefel an der Σ der Aerosol- bildner %
Schnabelseggenried	1	6	3,71	95,3%
	4	1	2,40	91,5%
Rohrglanzgrasröhricht	2	6	4,19	99,1%
	3	3	3,56	99,0%
Waldengelwurz-Kohldistel- Feuchtwiese	3	3	4,85	98,6%
	4*	1	3,61	96,4%
Waldstorcheschnabel- Goldhaferwiese	2	6	5,12	98,7%
	3	6	3,19	93,1%
Pfeifengras-Streuwiese	2	3	2,65	98,6%

* Varianten 4: Beerntung nur alle zwei Jahre

Niedrigere Gehalte dieser Elemente zusammen mit technischen Maßnahmen, wie der Einsatz einer Abscheidertechnologie beim Einsatz derartiger Brennstoffe und der Optimierung der Feuerungstechnik (LAUNHARDT, 2002) wirken sich positiv auf die Reduzierung von Emissionen aus.

Die im Vergleich zu Stroh deutlich höheren Rohaschegehalte müssen bei den Ascheaus-tragsystemen berücksichtigt werden, da sie hier eventuell zu größeren Problemen führen können.

Dagegen ist, außer bei den Aufwüchsen des Schnabelseggenrieds, durch die relativ hohen Ascheerweichungstemperaturen, nicht mit unerwünschter Schlackebildung und damit eventueller Störung und Betriebsunterbrechung zu rechnen (HARTMANN ET AL., 2000).

Die Elemente Kalium und Natrium senken die Ascheschmelztemperatur während die Elemente Kalzium und Magnesium die Ascheerweichungstemperatur erhöhen (OTTMANN, 2007).

Einschränkend muss eingeschätzt werden, dass den vorliegenden Ergebnissen eine sehr Untersuchungszahl zugrunde liegt.

Die Ergebnisse der Schwermetalluntersuchung haben informativen Charakter und können nicht bewertet werden, weil keine Referenz-/Grenzwerte aus dem Schrifttum bekannt sind. Es konnte aber ein Verdünnungseffekt in den Schwermetallgehalten der ersten Aufwüchse der zweischnittigen Varianten gegenüber den zweiten Aufwüchsen festgestellt werden. Dieser lässt sich durch eine höhere Trockenmassebildung der ersten Aufwüchse erklären. Die tendenziell höheren Schwermetallgehalte in den Aufwüchsen der einschnittigen gegenüber den ersten Aufwüchsen der zweischnittigen Nutzungsvarianten kann durch die späteren Schnitttermine erklärt werden.

Insgesamt stellte sich das untersuchte Heu als einsatzfähiger Brennstoff mit guter Verbrennungsqualität dar. Vor dem Hintergrund der aktuellen Gesetzgebung und möglichen technischen Optimierungsmaßnahmen besteht jedoch noch Bedarf zur Senkung von Emissionen im Abgas.

Die Festlegung des Grenzwertes für die im Versuch verwendete Technik, erfolgte jedoch für die Typenprüfung mit dem dort sonst verwendeten Brennstoff, in diesem Fall mit Stroh. Bei weiteren Optimierungen z.B. einer gezielten Luftmengenabstimmung auf den tatsächlich eingesetzten Brennstoff wie Heu/Landschaftspflegematerial, sollten sich auch die ab 2015 relevanten und noch weiter reduzierten Grenzwerte, auch in Kombination mit der Minimierung von CO-Emissionen, als realistisch erweisen.

Einfluss der Düngung auf die verbrennungsrelevanten Inhaltsstoffe der Aufwüchse

In der NPK-gedüngten Nutzungsvariante der **Waldstorcheschnabel-Goldhaferwiese** wurden durch die Verwendung von Kalkammonsalpeter rund 23 kg Ca ha⁻¹ ausgebracht und mit der Kaliumdüngung rund 137 kg Cl ha⁻¹. In der PK-gedüngten Nutzungsvariante wurde mit der Kaliumdüngung in Höhe von 110 kg ha⁻¹ rund 100 kg Cl ha⁻¹ ausgebracht.

Die Stickstoffdüngung führte zu keinen erhöhten Stickstoffgehalten in der Biomasse, was auf einen Verdünnungseffekt durch die Bildung hoher TM-Erträge, zurückgeführt werden kann. Gleiches gilt für die Kaliumdüngung.

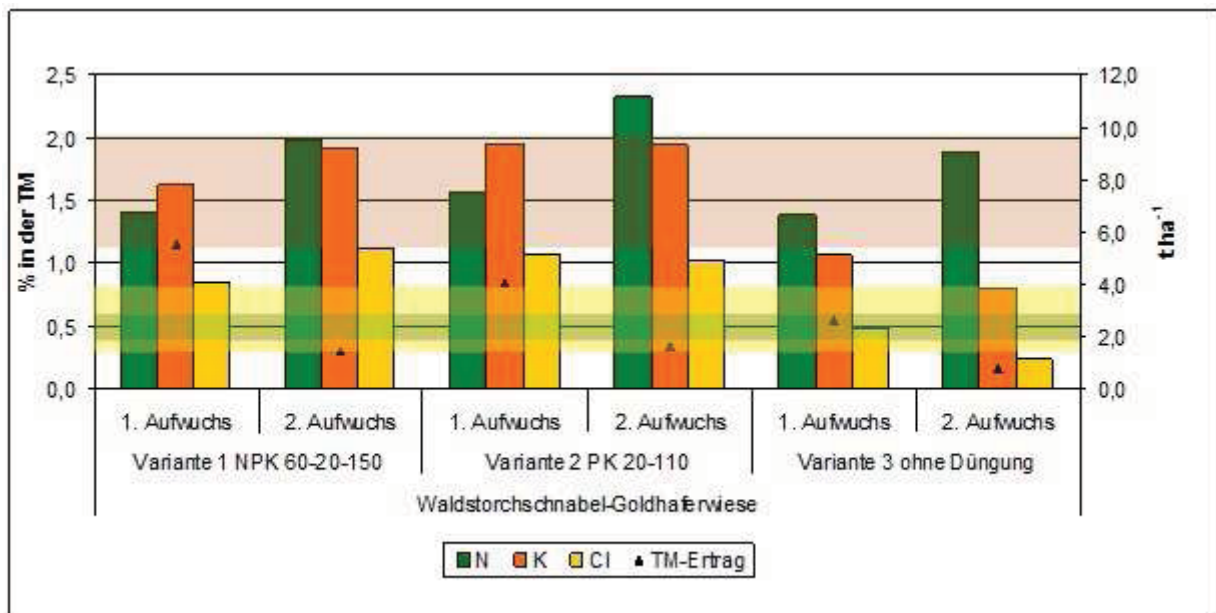


Abbildung 22: Gehalte der Elemente Stickstoff, Kalium und Chlor [% i. d. TM] in den Aufwüchsen der Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese bei NPK-Düngung (60-20-150), PK-Düngung (20-110) und ohne Düngung im Vergleich zu den Gehalten in Stroh (Balken) nach (RÖSCH ET AL., 2007) sowie die Trockenmasseerträge der Aufwüchse (in t ha⁻¹)

Durch die Düngung von Kalium mit 60er Kali wurde im großen Umfang auch Chlor gedüngt, was einen Einfluss auf die Chlorgehalte in den beiden mit Kalium gedüngten Nutzungsvarianten hatte. Dies führte in den Aufwüchsen der gedüngten Nutzungsvarianten zu höheren Chlorgehalten auch im Vergleich zu Stroh. Die Chlorgehalte in den Aufwüchsen der ungedüngten Nutzungsvariante zeigen, dass ohne die Zufuhr von Chlor über die Düngung, die Chlorgehalte von Stroh eingehalten und sogar unterschritten werden können.

Durch die Verwendung von Patentkali bei der Kaliumdüngung in der gedüngten Nutzungsvariante des **Rohrglanzgrasröhrichts** wurden zusätzlich zu den 140 kg K ha⁻¹ rund 34 kg Mg ha⁻¹, 17 kg Cl ha⁻¹ und 96 kg S ha⁻¹ mit ausgebracht.

In der Abbildung 23 sind die Stickstoff-, Kalium-, Chlor-, Magnesium- und Schwefelgehalte sowie der Trockenmasseertrag der Aufwüchse der jährlich beernteten Nutzungsvarianten des Rohrglanzgrasröhrichts abgebildet.

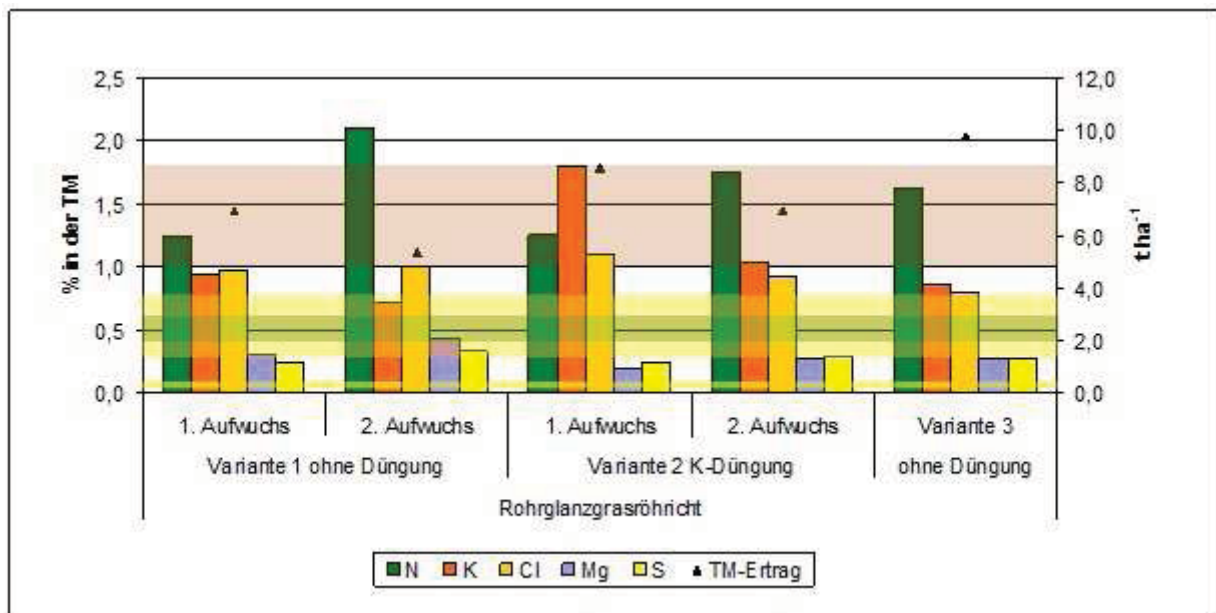


Abbildung 23: Gehalte der Elemente Stickstoff, Kalium, Chlor, Magnesium und Schwefel [% i. d. TM] in den Aufwüchsen des Rohrglanzgrasröhrichts bei K-Düngung (140 kg K ha^{-1}), einem Schnitt ohne Düngung und zwei Schnitten ohne Düngung, im Vergleich zu Stroh (Querbalken) nach (RÖSCH ET AL., 2007) sowie die Trockenmasseerträge der Aufwüchse (in t ha^{-1})

Die K-Düngung führte bei der zweischneittigen gedüngten Nutzungsvariante zu einem signifikant höheren Trockenmasseertrag (vgl. Kapitel 4.1, Abbildung 9) gegenüber der zweischneittigen ungedüngten als auch der einschnittigen ungedüngten Nutzungsvariante. Ebenso wie bei den gedüngten Nutzungsvarianten der Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese zeigte sich durch den höheren Trockenmasseertrag ein Verdünnungseffekt beim Stickstoffgehalt, vor allem des 2. Aufwuchses der gedüngten zweischneittigen Nutzungsvariante.

Die Chlorgehalte der Aufwüchse der zweischneittigen Nutzungsvarianten lagen über den Gehalten im Stroh. Nur der Chlorgehalt im Aufwuchs der einschnittigen, jährlich beernteten Nutzungsvariante lag mit 0,80 % im oberen Bereich der im Stroh genannten Gehalte. Durch die zusätzliche Zufuhr von Chlor über Patentkali kann der leicht höhere Gehalt im 1. Aufwuchs der gedüngten Nutzungsvariante erklärt werden.

Die zusätzliche Zufuhr von Magnesium führte auf dem sehr gut mit Magnesium versorgten Standort (vgl. Kapitel 3.1, Tabelle 8) zu keiner Erhöhung der Magnesiumgehalte in den gedüngten Aufwüchsen. Auch eine Erhöhung der Schwefelgehalte konnte durch die zusätzliche Zufuhr von Schwefel durch Düngung nicht beobachtet werden.

Das durchweg sehr positive Abschneiden der alle zwei Jahre beernteten Nutzungsvarianten, hinsichtlich der verbrennungsrelevanten Inhaltsstoffe, kann durch den überjährig stehenden Bestand und damit verbundener Auswaschung, besonders der Elemente Chlor und Kalium erklärt werden (HARTMANN ET AL., 2000; HENRICI ET AL., 2007). Außerdem trägt der späte Schnitttermin zu hauptsächlich niedrigeren Gehalten an Kalium, Chlor und Stickstoff bei (HARTMANN ET AL., 2000; TONN ET AL., 2008A). Beachtet werden muss aber, dass die Nutzungsvarianten mit Mahd alle zwei Jahre in dem Versuchszeitraum nur einmal geerntet wurden und somit auch nur ein Wert vorliegt. Das günstige Abschneiden der 4. Varianten zeigt somit nur Tendenzen an.

Die **Biomasseherstellungskosten** werden maßgeblich vom Ertrag und Düngungsbedarf bestimmt (Kapitel 4.7). Entsprechend hohe Erträge rechtfertigen demnach ökonomisch sinnvoll auch einen höheren Betriebsmittel- und Faktoreinsatz. Ein weiterer Ansatz zur ökonomischen Bewertung wäre der Bezug zum Heizwert. Die Heizwerte zeigten zwischen den Pflanzengesellschaften und Nutzungsvarianten relativ geringe Unterschiede. Bei diesen geringen absoluten Differenzen wäre die wirtschaftliche Betrachtung mit Bezug auf den Heizwert pro Hektar, also die zur Verfügung zu stellende Energiemenge pro Flächeneinheit, zielführend, weil damit die deutlichen Ertragsunterschiede noch besser zur Geltung kommen.

Ökologisch, ökonomisch und verbrennungstechnisch optimale Nutzungsvarianten der untersuchten Dauergrünland-Pflanzengesellschaften

Wie sich im Verlauf der Ergebnisbeschreibung und der Diskussion bereits gezeigt hat, sind die ertragreichsten bzw. die kostengünstigsten Nutzungsvarianten, mit denen die Mindestpflege gewährleistet ist, nicht immer diejenigen mit den günstigsten Verbrennungseigenschaften. Beispielsweise hat die PK-gedüngte Nutzungsvariante gegenüber der ungedüngten Nutzungsvariante bei der Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese einen höheren TM-Ertrag sowie niedrigere Biomasseherstellungskosten, aber eine schlechtere Verbrennungseignung. Gleiches gilt für die ungedüngte einschnittige Nutzungsvariante der Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese gegenüber den zweischnittigen Varianten.

Die Nutzungsvariante mit Gewährleistung der Mindestpflege bei der Pfeifengras-Streuwiese hatte bei geringfügig höheren Biomasseherstellungskosten und leicht niedrigerem Ertrag die günstigsten Verbrennungseigenschaften.

Die Ausschöpfung des Ertragspotenzials des Schnabelseggenrieds mit zwei Schnitten pro Jahr, führte zu den höchsten Herstellungskosten bei deutlich schlechterer Verbrennungseignung gegenüber der einmaligen Mahd alle zwei Jahre.

Die K-gedüngte zweischnittige Nutzungsvariante beim Rohrglanzgrasröhricht ist die ertragreichste Nutzungsvariante, bei vergleichbar günstigen Biomasseherstellungskosten aber der ungünstigsten Verbrennungseignung.

Die aus der Gesamtbewertung der Indikatoren:

- Mindestpflege zur Gewährleistung eines guten Erhaltungszustandes,
- Verbrennungseignung,
- Biomasseherstellungskosten und
- Ertrag

resultierenden, zweckmäßigsten Nutzungsvarianten der entsprechenden Pflanzengesellschaften sind im Folgenden aufgelistet und in Abbildung 24 nochmals in Relation zur Strohnutzung dargestellt.

- **Schnabelseggenried (Großseggenried)**
Ernte aller zwei Jahre Ende September (Variante 4)
- **Rohrglanzgrasröhricht**
zwei Schnitte, Mitte Juni und Mitte September, K-Düngung (Variante 2)
- **Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese**
ein Schnitt Mitte August (Variante 3)

- **Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese**
zwei Schnitte, Ende Juni und Mitte September, PK-Düngung (Variante 2)
- **Pfeifengras-Streuwiese**
ein Schnitt Mitte September (Variante 2)

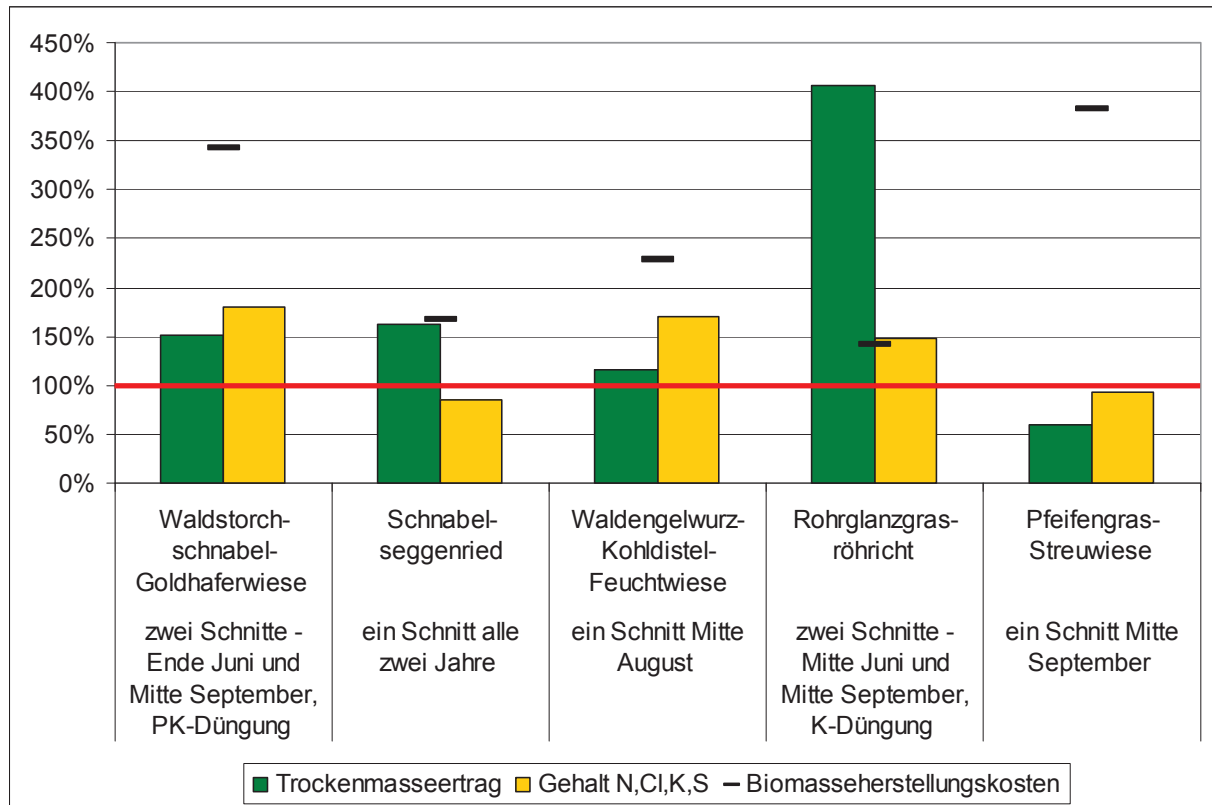


Abbildung 24: Die zweckmäßigsten Nutzungsvarianten im Vergleich zu Stroh (rote Linie, Annahme: TM-Ertrag: $3,8 \text{ t TM ha}^{-1}$, Biomasseherstellungskosten: 60 € t^{-1} (BREITSCHUH ET AL., 2006), Gehaltsumme der Elemente Stickstoff, Chlor, Kalium, Schwefel: 2,84 % i. d. TM (HERING ET AL., 2008))

Die zweckmäßigsten Nutzungsvarianten stellen also einen Kompromiss aus Verbrennungseignung und Ökonomie, d.h. Biomasseherstellungskosten und Ertrag dar.

Bei dem **Schnabelseggenried** hat sich als die zweckmäßigste Nutzungsvariante eine Nutzung alle zwei Jahre Ende September herausgestellt. Die Mindestpflege zur Gewährleistung eines guten Erhaltungszustandes wird mit dieser Nutzungsvariante sichergestellt, zudem sind die Gehalte der verbrennungsrelevanten Inhaltsstoffe bei diesem Dauergrünlandtyp, im Vergleich aller vier Nutzungsvarianten, am niedrigsten. Die Biomasseherstellungskosten lagen nur geringfügig über denen der kostengünstigsten Nutzungsvariante bei dieser Pflanzengesellschaft. Der TM-Ertrag betrug allerdings nur zwei Drittel gegenüber der jährlich zweimaligen geernteten Nutzungsvariante. Im Vergleich zu **Stroh** war der TM-Ertrag zwei Drittel höher bei sehr günstigen Gehalten an verbrennungsrelevanten Inhaltsstoffen (84 %). Dafür lagen aber die Biomasseherstellungskosten rund zwei Drittel über denen von Stroh. Beachtet werden muss, dass bei einer Nutzung nur alle zwei Jahre auch nur alle zwei Jahre Biomasse für die Verbrennung bereit steht.

Als zweckmäßigste Nutzungsvariante bei dem **Rohrglanzgrasröhricht** erwies sich die zweimalige Nutzung Mitte Juni und Mitte September mit einer K-Düngung im Frühjahr. Bei dieser Nutzungsvariante wird der gute Erhaltungszustand nachhaltig sichergestellt. Zudem ist der höchste TM-Ertrag erzielt worden, der ein Drittel über dem TM-Ertrag der jährlich einmal geernteten Nutzungsvariante lag, bei vergleichbaren Biomasseherstellungskosten. Die Gehalte an verbrennungsrelevanten Inhaltsstoffen lagen dagegen bei 168 % im Vergleich zu **Stroh**. Dafür hatte die zweischnittige Nutzungsvariante mit K-Düngung einen mehr als 4-mal so hohen TM-Ertrag aber auch um 42 % höhere Biomasseherstellungskosten als Stroh

Die einschnittige Nutzung Mitte August ist bei der **Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese** die zweckmäßigste Nutzungsvariante. Neben der Sicherstellung, den Dauergrünlandtyp in einem guten ökologischen Zustand zu erhalten, zeichnet sich diese Nutzungsvariante durch den höchsten TM-Ertrag und den niedrigsten Biomasseherstellungskosten unter den jährlich geernteten Nutzungsvarianten dieses Dauergrünlandtyps aus. Dagegen war der Gehalt der verbrennungsrelevanten Inhaltsstoffe bei dieser Nutzungsvariante am höchsten und lag ein Drittel über dem Gehalt der alle zwei Jahre geernteten Nutzungsvariante, die auf sickerwasserreichen Standorten auch ausreichend wäre, diesen Dauergrünlandtyp in einem guten Erhaltungszustand zu erhalten. Im Vergleich zu **Stroh** war der TM-Ertrag mit 16 % leicht höher. Dagegen lagen die Biomasseherstellungskosten mit mehr als dem 2-fachen und die Gehalte an verbrennungsrelevanten Inhaltsstoffen mit 171% deutlich über den entsprechenden Werten für **Stroh**.

Als zweckmäßigste Nutzungsvariante bei der **Waldstorcheschnabel-Goldhaferwiese** erwies sich eine zweischnittige Nutzung mit den Ernteterminen Ende Juni und Mitte September sowie einer PK-Düngung im Frühjahr. Diese Nutzung ist am besten geeignet diesen Grünlandtyp produktiv zu erhalten. Gegenüber der Nutzungsvariante ohne Düngung, die den Grünlandtyp als Magerrasentyp erhalten würde, liegen die TM-Erträge zwei Drittel höher und die Biomasseherstellungskosten ein Drittel niedriger. Dafür lagen aber die Gehalte der verbrennungsrelevanten Inhaltsstoffe zwei Drittel über den entsprechenden Gehalten bei der Nutzungsvariante ohne Düngung. Verglichen mit **Stroh** hatte die zweckmäßigste produktive Nutzungsvariante einen um die Hälfte höheren TM-Ertrag bei allerdings ca. 3,4-fach so hohen Biomasseherstellungskosten und den 1,8-fachen Gehalt an verbrennungsrelevanten Inhaltsstoffen.

Bei der **Pfeifengras-Streuwiese** konnte die jährliche Nutzung Mitte September als zweckmäßigste Nutzungsvariante identifiziert werden. Die Gehalte an verbrennungsrelevanten Inhaltsstoffen lagen unter allen Nutzungsvarianten dieses Dauergrünlandtyps und somit am niedrigsten. Verglichen mit **Stroh**, erreichte der TM-Ertrag dieser Nutzungsvariante nur zwei Drittel aber die Biomasseherstellungskosten lagen um die Hälfte höher. Jedoch war der Gehalt an verbrennungsrelevanten Inhaltsstoffen mit denen von Stroh weitestgehend vergleichbar.

Aufgrund der begrenzten bewirtschaftungsrelevanten Anpassungsmöglichkeiten der betrachteten Pflanzengesellschaften und der so, aufgrund der zusätzlichen Arbeitsschritte des Anwelkens, hohen Biomasseherstellungskosten, sollte die Option der „Mitvergärung“ von frischer Biomasse dieser Pflanzengesellschaften geprüft werden. Dazu wären als nächste Schritte die Bestimmung der Methanausbeuten sowie die Berechnung der Biomasseherstellungskosten des Grüngutes erforderlich.

Biomassepotenzial zur energetischen Nutzung vom Dauergrünland

Wie an anderer Stelle dieser Arbeit ausgeführt werden die Ertragsleistung und Aufwuchsqualität der einzelnen Grünlandflächen werden vor allem durch die Standortbedingungen und Flächenbewirtschaftung bestimmt (KÄDING ET AL., 2005). Zu den Standortbedingungen zählen in erster Linie die natürlichen Gegebenheiten wie Boden und Klima. Weitere wichtige Parameter sind Nährstoffversorgung, Wasserverhältnisse und Vegetationstyp; die sowohl natürlichen als auch anthropogenen Ursprungs sein können. Die Flächenbewirtschaftung hängt von der menschlichen Tätigkeit ab und lässt sich durch Art und Intensität der Nutzung charakterisieren. Durch Untersuchung und Messung ist es möglich, den Einfluss dieser Parameter auf die Ertragsbildung einzelner Standorte festzustellen. Es gestaltet sich aber sehr schwierig, diese Ergebnisse auf eine ganze Region zu übertragen: entweder fehlen flächendeckende Karten wie z.B. Vegetationstypen oder vorhandene Informationen, wie z.B. Wasserverhältnisse, sind veraltet. Nicht selten mangelt es an Ertragsmessungen für ein breites Spektrum von möglichen Parameterkombinationen. Einige Parameter, wie ausgebrachte Düngermengen, lassen sich für einzelne Felder kaum zusammenfassen. Andere Parameter wie Schnitthäufigkeit oder Bewirtschaftungsart (Weide/ Wiese/ Mähweide) können, abhängig von Witterungsbedingungen und betrieblichen Abläufen, von Jahr zu Jahr variieren. Auch die statistischen Informationen zu den regionalen Grünlanderträgen liefern oft ein ungenaues und zu allgemeines Bild. Häufig wissen die Landwirte selbst nur ungefähr, wie hoch die Erträge auf ihren Grünlandflächen sind, da diese nicht systematisch erfasst werden.

Die durchgeführten Untersuchungen und Berechnungen haben gezeigt, dass in der Modellregion Havelland ein Biomassepotenzial vom Dauergrünland für die energetische Nutzung vorhanden ist. Eine gewisse Unsicherheit besteht hinsichtlich der genauen Mengen des Biomassepotenzials. Die den Kalkulationen zugrundeliegenden Grünlanderträge bilden die durchschnittlichen Werte über mehrere Jahre ab. Zum Zwecke der Energiegewinnung gesammelte Biomasse kann konserviert und über einige Jahre lagerfähig gemacht werden. So können Mehrererträge eines ertragreichen Jahres Ertragsausfälle ungünstiger Jahre ausgleichen. Die Besonderheit bei der Ertragsermittlung des Grünlandes besteht jedoch darin, dass mit großen Unterschieden aufgrund der Qualität und Nutzungsintensität zu rechnen ist. Während sich Biomasseerträge von optimal produktiv bewirtschafteten Flächen vor allem aufgrund der ausgebrachten Düngemengen unterscheiden, lassen die abwechslungsreichen Pflanzenbestände von extensiv bewirtschafteten Flächen keine pauschalen Aussagen zu. Zwar können, wie in der Modellregion Saalfeld-Rudolstadt, einzelne Biotoptypen aus den Biotop- und Lebensraumkartierungen abgeleitet werden, die Kartierungen sind jedoch nicht flächendeckend und nicht dynamisch. In welchem Extensivierungsstadium sich die Flächen gerade befinden, kann nur unpräzise festgestellt werden. Auch sind die extensiven Grünlandflächen in sich sehr heterogen. Dementsprechend können sowohl die zu erwartenden Erträge, als auch die für die energetische Nutzung relevanten Eigenschaften im hohen Maße variieren. Bei der Ermittlung der Biomassepotenziale vom Dauergrünland empfiehlt sich daher eine eher moderate Ertragsschätzung.

Die verwendeten Datengrundlagen unterschieden sich in den beiden Modellregionen. Eine Verschneidung der auf Gemeindeebene anonymisierten InVeKoS-Daten im LK SLF mit der allgemein verfügbaren Biotoptypen- und Nutzungstypenkartierung führte zu dem bereits angesprochenen Problem der Nichtkompatibilität der Flächen. Um die Güte dieser Flächenschätzungen zur Berechnung von Grünland-Biomassepotenzialen zu prüfen, wurden die so ermittelten Werte mit Kontrolldaten abgeglichen (Kapitel 4.8.1). Die Flächenangaben, mit den

sich dadurch folglich unterschiedlich ergebenden Ertragspotenzialen, wichen erheblich voneinander ab, so dass der Versuch im Landkreis SLF anhand öffentlich zugänglicher Daten eine Potenzialschätzung vornehmen zu können, nicht seriös durchzuführen war.

Alle hier vorliegenden Kalkulationen für den LK HVL bezüglich der Erträge und des Futterbedarfs landwirtschaftlicher Nutztiere sind auf die Trockenmasse bezogen. Daher relativiert sich gewissermaßen der Unterschied zwischen den errechneten Mengen an Grassilage, Heu und Weide. Das Biomassepotenzial vom Dauergrünland, in Tonnen Trockenmasse ausgedrückt, stellt einen eindeutigen und vergleichbaren Wert dar. In welcher Form die Grünlandaufwüchse genutzt werden sollen, kann jeder Landwirt selbst bestimmen. Entscheidend ist, wie viel Trockenmasse, nach Deckung des Futterbedarfs in der Tierhaltung, für die Energiegewinnung verfügbar ist. Außer der Höhe des energetisch nutzbaren Biomassepotenzials ist aber auch dessen Qualität von großer Bedeutung. Die im Rahmen dieses Projektteiles ermittelten, energetisch nutzbaren Biomassepotenziale vom Dauergrünland wurden für die Verbrennung und Biogaserzeugung als gleichwertig geeignet angenommen. In der Praxis entscheiden mehrere Parameter über die Form der Graskonservierung, nämlich der Trockenmassegehalt des Aufwuchses, die Grünlandqualität sowie betriebliche Bedürfnisse und Kapazitäten. Auch Wirtschaftlichkeitsaspekte bei der Futterwerbung spielen dabei eine wichtige Rolle. Sollte daher die eine oder andere Art der Bioenergieerzeugung als besonders gewinnbringend erscheinen, würden sich die Landwirte nach und nach auf die entsprechende Konservierungsform einstellen. Auf diese Weise ließe sich die Rentabilität ihrer landwirtschaftlichen Betriebe zusätzlich unterstützen.

Durch die teilweise statistische Nichterfassung von Nebenerwerbs- und Hobbylandwirten, wäre das tatsächlich anzunehmende Grünlandpotenzial demnach entsprechend höher. Andererseits ist der Futterbedarf von Raufutter verzehrenden Tieren, die keinem landwirtschaftlichen Betrieb zugeordnet sind, außer Acht gelassen worden, wodurch sich das Grünlandpotenzial in etwa wieder ausgleicht.

Informationen zu den Tierbeständen lagen lediglich auf Gemeindeebene vor. Bei der statistischen Datenerfassung werden die Tierbestände immer derjenigen Gemeinde zugeschrieben, in der sich der Betriebssitz befindet. Aufgrund der Anonymisierung der erhaltenen Daten ist es nicht möglich, landwirtschaftliche Flächen und Tierbestände konkreten Betrieben zuzuordnen. Daher fand die Bilanzierung des Grünlandpotenzials und des -bedarfs auf Gemeindeebene statt. Diese Vorgehensweise mag anfechtbar sein, da die administrative Teilung des Gebietes die natürliche Flächenverteilung und die etablierten Betriebsstrukturen nur geringfügig widerspiegelt. Nichtsdestotrotz ist dies die einzige Möglichkeit, mit der gegebenen Datenqualität das energetisch nutzbare Biomassepotenzial vom Dauergrünland räumlich darzustellen.

Sowohl die bewirtschafteten Flächen als auch die Tierbestände eines Betriebes können über mehrere Gemeinden verteilt sein. Daher kann es passieren, dass der aufgrund der Tierbestände errechnete Grünlandbedarf einer Gemeinde ihren tatsächlichen Grünlandbedarf übertrifft. Gleichzeitig aber zeigen andere Gemeinden ein hohes Grünlandpotenzial, das jedoch in der Wirklichkeit für die Viehbestände benötigt wird. Auch können die Biogasanlagen einer Gemeinde ihre benötigten Grassilagemengen durch Nutzung von Grünlandflächen anderer Gemeinden decken. Dieser unvermeidbare Fehler konnte zum Teil bei der Bilanzierung korrigiert werden, in dem der negative Grünlandsaldo einer Gemeinde durch den Grünlandüberschuss der benachbarten Gemeinden ausgeglichen wurde.

Infolge einiger Unsicherheiten bei den Ertragshöhen, Ertragszuweisungen, Futterrationen und Betriebsstrukturen ist das ermittelte energetisch nutzbare Biomassepotenzial vom Dauergrünland auf Gemeindeebene als Orientierungswert zu verstehen. Die durchgeführten Bilanzierungen erlauben aber die räumliche Verteilung energetisch nutzbarer Biomasse festzustellen und zu veranschaulichen.

Nutzung des verfügbaren Biomassepotenzials vom Dauergrünland für die Energiegewinnung

Die Möglichkeit eines wirtschaftlichen Betriebes von Bioenergieanlagen unter Verwendung von Grünlandaufwüchsen kann gute Perspektiven für verfügbares Biomassepotenzial vom Dauergrünland eröffnen. Um die dafür aussichtsreichsten Varianten zu ermitteln, müssen verschiedene Konzepte der Energiegewinnung analysiert werden. Die Erschließung von energetisch nutzbarer Biomasse vom Dauergrünland für eine stabile Wärme- und/oder Stromerzeugung könnte sowohl die regionale Wertschöpfung stärken als auch positive ökologische Effekte begünstigen.

Eine **dezentrale Verbrennung** in automatisch beschickten, halmguttauglichen Feuerungsanlagen kann unter derzeit herrschenden Marktbedingungen kaum rentabel erfolgen. Keine der modellierten Halmgutfeuerungsanlagen im LK HVL hat die Wirtschaftlichkeitsschwelle erreicht. Die aufwändige Konstruktion solcher Heizwerke, kostspielige Rohstoffvorbehandlung und -zuführung sowie evtl. verkürzte Lebenszeiten der Anlagen, verursachen hohe Anschaffungs- und Betriebskosten. Auch die Zulassung der Halmgutfeuerungen gestaltet sich schwieriger, als die der Hackschnitzelfeuerungen.

Je nach örtlichen Gegebenheiten und Bauart der Halmgutfeuerungsanlage können die Kosten in weitem Maß variieren. Für vergleichbare Berechnungen fehlt eine umfassende, öffentlich zugängliche Datenbank zur Höhe von Heizwerkkosten. Die meisten Werte werden von den Hackschnitzelfeuerungen abgeleitet. Allerdings muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass Investitionen in Betriebsgebäude (Heizungsraum, Rohstofflager) eingespart werden können, wenn ein landwirtschaftlicher Betrieb über geeignete freie Kapazitäten verfügt.

Feuerungsanlagen für Halmgut unterliegen ab einer Feuerungswärmeleistung von 100 kW der 4. BImSchV, was einen erhöhten Aufwand bei der Genehmigung solcher Anlagen mit sich bringt. Auch größere Investitionen in Ascheaustrags- und Filtersysteme müssen eingeplant werden, um die Emissionsgrenzwerte der TA-Luft einzuhalten. Holzheizungen dagegen sind erst ab 1 MW nach der 4. BImSchV genehmigungspflichtig und haben deswegen einen Wettbewerbsvorteil. Die einzige Chance für Halmgutfeuerungen besteht darin, kostengünstigere Substrate einsetzen zu können. Die Differenz zwischen den Heu- und Holzhackschnitzelkosten sollte die Mehraufwendungen für das Errichten und den Betrieb einer halmguttauglichen Feuerungsanlage kompensieren können. Die durch die verschiedenen Förderprogramme gewährten Flächenprämien können den Heupreis deutlich reduzieren. Bei den modellierten Heizwerken konnten aber die gewährte Grünlandförderung in Höhe von 382 € ha⁻¹ (LK HVL) die hohen jährlichen Kosten nicht ausgleichen. Biomasseverbrennungsanlagen werden derzeit lediglich durch Tilgungszuschüsse des Marktanreizprogramms unterstützt. Die durchgeführten Wirtschaftlichkeitskalkulationen zeigten, dass die Wärmegestehungskosten der modellierten Halmgutfeuerungen zwischen 0,09 und 0,10 € kWh⁻¹ liegen. Bei einem angenommenen Wärmeverkaufspreis von 0,06 € kWh⁻¹ bringt die Biomasseverbrennung

Verluste ein. Könnte die Wärme zu einem höheren Preis verkauft werden bzw. würden die Investitionen in Halmgutf Feuerungen stärker durch den Staat unterstützt, so könnte die dezentrale Verbrennung von Grünlandbiomasse wirtschaftlich betrieben werden.

Unter bestimmten Voraussetzungen kann die **zentrale Biomasseverbrennung** zur gleichzeitigen Strom- und Wärmeproduktion ökonomisch sinnvoll sein. Die Rohstoffpreise spielen bei zentral geplanten Biomasseheizwerken mit hohem Rohstoffumsatz eine viel größere Rolle als bei dezentralen. Daher ist es äußerst wichtig, langfristige Lieferverträge abzuschließen, um sich über einen längeren Zeitraum hinweg Planungssicherheit hinsichtlich Rohstoffmengen und -preis zu verschaffen. Nur auf diese Weise kann ein stabiler und profitabler Anlagenbetrieb gewährleistet werden.

Trotz der gewährten Vergütungen des EEG ist die verkaufte Wärmemenge von erheblicher Bedeutung. Eine räumliche Nähe der zentralen Heizkraftwerke zu großen Siedlungen mit hohen Bevölkerungsdichten kann die ausreichende Wärmenachfrage maßgeblich begünstigen. Die Versorgung großer Wärmeabnehmer wie Krankenhäuser, Schwimmbäder oder Industriebetriebe kann sich entscheidend auf die Wirtschaftlichkeit der Biomasse-Heizkraftwerke auswirken, da eine hohe Wärmebedarfsdichte der Wärmenetze für kürzere Leitungen und damit geringere Investitionskosten sorgt. Bei den modellierten Verbrennungsanlagen wurden der Heizwärme- und Warmwasserbedarf ausschließlich in Wohngebäuden berücksichtigt. Sollte das Anschließen eines großen Wärmeabnehmers möglich sein, kann sich die Wirtschaftlichkeit der Anlagen wesentlich erhöhen. Obwohl Großabnehmer einen günstigeren Wärmepreis als Einzelverbraucher erhalten, überwiegt dann der wirtschaftlich positive Effekt durch die verkürzte Wärmetrasse. Infolge der Novelle des EEG in 2011, deren neue Regelungen und Vergütungen ab dem 1. Januar 2012 in Kraft treten, wird sich die Wirtschaftlichkeit großer KWK-Anlagen voraussichtlich verbessern. Eine genauere Aussage bedarf jedoch einer ausführlichen Prüfung.

Als Alternative zur Wärmelieferung kann möglicherweise auch die Kälteerzeugung in Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) in Betracht gezogen werden. Diese Anlagen können in den Sommermonaten weiter betrieben werden und dadurch höhere Wirkungsgrade erzielen. Eine mögliche Wirtschaftlichkeitssteigerung durch KWKK wurde aber im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse der **Biomethanisierung in dezentralen Biogasanlagen** zeigt, dass auch dieser Verwertungspfad für energetisch nutzbare Grünlandaufwüchse denkbar ist. Da die zur energetischen Nutzung verfügbaren Grünlandaufwüchse meistens von extensiv bewirtschafteten Flächen stammen, wurden zurückhaltende Methanausbeuten von $250 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1} \text{ oTM}$ angenommen. Die Methanausbeuten von produktiv bewirtschaftetem Dauergrünland können aber weit über $300 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1} \text{ oTM}$ liegen. Dies bedeutet, dass das Energiepotenzial der betreffenden Dauergrünlandflächen bei einer optimierten und gezielten Flächenbewirtschaftung bis zu einem gewissen Grad sogar noch erhöht werden kann.

Bei den modellierten Biogasanlagen wurden Wirtschaftsdünger als weiteres Substrat für die Biogaserzeugung angenommen. Ein noch unberücksichtigtes, nicht zu unterschätzendes Potenzial an Wirtschaftsdüngern steckt in den gewerblichen Schweinezucht- und -mastbetrieben, die in den Statistiken der landwirtschaftlichen Förderung auf Gemeindeebene nicht aufgeführt sind. Durch das Errichten einer Biogasanlage in diesen, Schweine haltenden Betrieben, könnte so noch weiteres Biomassepotenzial vom Dauergrünland zur Biogasge-

winnung erschlossen werden, mit dem weiteren Vorteil, dass anfallende Wärme zur Beheizung der Schweineställe genutzt werden kann.

Durch die EEG-Novelle im Jahr 2011 ändern sich vor allem die wirtschaftlichen Bedingungen der Stromproduktion aus Biomasse. In welchem Maße die vorgenommenen Änderungen die Wirtschaftlichkeit der im Rahmen dieses Projektes modellierten Anlagen betreffen, kann erst nach einer rechtsverbindlichen Veröffentlichung des Gesetztextes im Bundesgesetzblatt und deren verbindliche Auslegung genau beurteilt werden.

6 Schlussfolgerungen

- Die vorliegende Arbeit liefert auf der Grundlage eines bundesweiten, methodisch einheitlichen Feldversuchs auf Praxisflächen, für sechs naturschutzfachlich besonders wertvolle Dauergrünland-Pflanzengesellschaften, erste Orientierungswerte zur Verbrennungseignung und thermischen Verwertung, der aus jeweils vier verschiedenen Nutzungs-/Pflegevarianten anfallenden Biomasse und ist damit in ihrer Informationstiefe wie auch -breite bisher einzigartig.
- Auf Grundlage des umfangreichen, belastbaren Datenmaterials konnten die für die Erhaltung der jeweiligen Dauergrünland-Pflanzengesellschaften in einer standortangepassten Ausstattung geeigneten und gleichzeitig ökonomisch sinnvollsten Nutzungsvarianten mit einer günstigen Verbrennungseignung identifiziert werden.
- Die Verbrennung der Biomasse von Grünlandaufwüchsen ist im Vergleich zu der Strohverbrennung, infolge meist höherer Gehalte verbrennungsrelevanter Inhaltsstoffe mit technisch höherem, anspruchsvollerem Aufwand verbunden, aber praxistauglich möglich.
- Diesem Problem eines differenzierteren Brennstoffes muss mit der Anpassung der Verbrennungstechnik begegnet werden, da durch die Sicherstellung des Erhaltes der Dauergrünland-Pflanzengesellschaften kaum Anpassungsmöglichkeiten bei der Bewirtschaftung des Dauergrünlandes und damit bei der Bereitstellung von für die Verbrennung geeigneter Biomasse bestehen.
- Aufgrund dieser begrenzten bewirtschaftungsrelevanten Anpassungsmöglichkeiten sollte die Option der „Mitvergärung“ von frischer Biomasse der untersuchten Pflanzengesellschaften geprüft werden. Dazu wären als nächste Schritte die Bestimmung der Methan- ausbeuten sowie die Berechnung der Biomasseherstellungskosten des Grüngutes erforderlich.
- Am Beispiel der Modellregion Saalfeld-Rudolstadt hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse der Biotoptypenkartierung als Flächengrundlage für die Schätzung des energetisch nutzbaren Biomassepotenziales auf der Ebene der Gemeinde zu nicht nachvollziehbaren Ergebnissen führen. Hier bedarf es eines GIS-basierten Ansatzes unter Zuhilfenahme diverser Informationen aus der Agrar- und oder Umweltförderung mit Bezug zum jeweiligen Feldblock, um die Biomasseschätzung auf Gemeindeebene seriös vornehmen zu können. Die Verfügbarkeit derartiger Daten ist jedoch leider in den seltensten Fällen gegeben. Selbst beim BfN liegen keine national einheitlichen Biotoptypenkartierungen vor.
- Eine Schätzung des Biomassepotenzials vom Dauergrünland einer Gemeinde für die energetische Nutzung muss anhand der für die entsprechende Modellregion geeigneten Datengrundlage erfolgen. Eine einheitliche Informationsgrundlage für verschiedene Modellregionen ist auf absehbare Zeit nicht in Aussicht.

7 Zusammenfassung

Dauergrünland stellt einen großen Teil des landwirtschaftlichen Biomassepotenzials und ist dabei ökologisch multifunktional. Dennoch läuft Grünland Gefahr, durch Umbruch bzw. Nichtnutzung verloren zu gehen. Deswegen sollten mit dem Verbundprojekt „GNUT-Verbrennung“ Strategien erarbeitet werden, wie und in welchen Mengen der Aufwuchs von extensiven Dauergrünlandflächen mit oder ohne Bewirtschaftungsauflagen in geeigneter Form thermisch genutzt werden kann. Diese Strategien wurden ökologisch und ökonomisch anhand entsprechender Kriterien bewertet.

Hierfür wurden fünf Grünlandstandorte ausgewählt, die alle typischen Grünlandregionen Deutschlands abbilden und unterschiedliche, natürliche Bedingungen und Bewirtschaftungsintensitäten repräsentieren. Der Versuch wurde mit jeweils vier Varianten als einfaktorieller Versuch (Schnittregime bzw. Düngung) in vierfacher Wiederholung als vollständig randomisierte Blockanlage auf Praxisflächen mit dem jeweiligen Grünlandtyp angelegt. Nach der jeweiligen Ernte wurde der Frisch- und Trockenmasseertrag ermittelt.

Die gewonnenen Grüngutproben analysierte die TLL auf Gehalte an Roh Nährstoffen sowie Makro- und Mikronährstoffen, Schwermetallen, elementarem Kohlenstoff, den Heizwert und Sandgehalt. In ausgewählten Varianten wurden die Ascheerweichungstemperaturen ermittelt. Der energetische Futterwert wurde nach der allgemeingültigen Schätzformel in der Tierernährung berechnet.

Zusätzlich wurden 20 Heu-Großballen eines definierten Grünlandtyps im Praxisversuch in einer Kleinf Feuerungsanlage (Regelbrennstoff Stroh) verbrannt und sowohl das Abbrandverhalten als auch die Emissionswerte ermittelt.

Eine vegetationskundliche Aufnahme der Flächen erfolgte vor Versuchsbeginn und wurde jedes Jahr wiederholt, um daraufhin den Erhaltungszustand des Typs in jeder Variante bewerten zu können. In Modellregionen wurden mögliche Biomassepotenziale der Grünlandaufwüchse für die Verbrennung und/oder Vergärung in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Daten nach der sich daraufhin ergebenden Methode kalkuliert.

Ertragsdaten konnten aus allen drei Versuchsjahren der fünf Standorte und jeweils vier Varianten mit je vier Wiederholungen statistisch verrechnet werden. Alle getesteten Effekte (Grünlandtyp, Variante, Aufwuchs) sowie deren Interaktionen hatten einen hoch signifikanten Einfluss ($p \leq 0,001$) auf den Trockenmasseertrag pro Jahr. Das Biomassepotenzial der Vegetationstypen reichte im Durchschnitt der drei Jahre von 2,3 t TM/ha auf der Streuwiese bis zu 15,4 t TM/ha auf der Rohrglanzgrasfläche. Varianten mit Düngung und/oder zweischnittige Varianten sind hinsichtlich des Ertrags zu bevorzugen. Allerdings rechtfertigen die Erträge der Kohldistel- und Streuwiese eine Zweischnittnutzung nicht.

Die Systemgrenze der berechneten Rohstoffherstellungskosten endet mit dem Heuballen auf dem Betrieb. Hierbei haben sich die Variante 1 des Rohrglanzgrases und die Variante 2 des Groß-Seggenrieds als die kostengünstigsten Varianten erwiesen, deutlich beeinflusst durch die Höhe des Trockenmasseertrages. Für alle anderen Vegetationstypen zeigt sich die vierte Variante (Schnitt alle zwei Jahre) als die mit den jeweils geringsten Kosten pro t TM.

Für die Tierernährung ist keine Variante uneingeschränkt geeignet. Am ehesten eignen sich die Aufwüchse der Goldhaferwiese, aufgrund der relativ hohen Gehalte an Roh Nährstoffen. Die ertragreichen Varianten weisen meist jedoch auch einen hohen Gehalt an Nährstoffen

und Schwermetallen auf, die für die Verbrennung ungünstig sind, da sie Korrosion und Verschlackung sowie Emissionen fördern. Gerade Kalium beeinflusst auch den Ascheschmelzpunkt ungünstig, was zur Verschlechterung der Verbrennungseignung der gedüngten Varianten führt.

Der Praxisversuch hat gezeigt, dass die emissionsrechtlich konforme Verbrennung von Heu in Kleinfeuerungsanlagen möglich ist, wenn eine technische Anpassung an den jeweiligen speziellen Brennstoff erfolgt, um ein optimales Abbrandverhalten zu gewährleisten.

Als Empfehlung wurden Varianten herausgearbeitet, die vordergründig die Erhaltung des Vegetationstyps gewährleisten und dabei gute ökonomische sowie Ertragsleistungen und eine gute Verbrennungseignung der Aufwüchse aufweisen.

Die realistische Quantifizierung der Biomassepotenziale des Grünlands in den Modellregionen ist stark abhängig von den verfügbaren Daten und ist bisher nur nach einer Methode in einer Modellregion umgesetzt. Frei zugängliche sowie Flächendaten ohne direkten Feldblockbezug sind für verlässliche Schätzungen nicht geeignet.

8 Literaturverzeichnis

- Anacker G 2009a Analyse der Haltungsbedingungen für Kälber und Jungrinder in Thüringer Milchproduktionsbetrieben. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena.
- Anacker G 2009b Analyse der Haltungsbedingungen für Kühe in Thüringer Milchproduktionsbetrieben. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena.
- Birnbaum T, Berger M 2010 Emissionsverhalten eines Grüngut-Brennstoffs an der Kesselanlage eines Landwirtschaftsbetriebes, ILK Dresden - Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH, Fachbericht ILK-B-33-10-1569, unveröffentlicht
- BMU 2011 Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt vom 11. März 2011. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Breitschuh G, Degner J, Reinhold G, Strümpfel J und Vetter A 2006 Orientierungspreise für die Bereitstellung von marktfähiger Biomasse zur energetischen Verwertung. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena
- Degner J 2010 Betriebswirtschaftliche Richtwerte für die Produktion von Silage, Heu und Weidefutter aus Feldgras (zur Fütterung). Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena.
- Döring S 2010 Pellets als Energieträger: Technologie und Anwendung. Springer, Berlin Heidelberg.
- EEG 2009 Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG).
- Elsäßer M 2003 Möglichkeiten der Verwendung alternativer Verfahren zur Verwertung von Grünlandmähgut: Verbrennen, Vergären, Kompostieren. Berichte über Landwirtschaft 4. S. 512-526.
- Elsäßer M 2004 Alternative Verwendung von in der Landschaftspflege anfallendem Grünlandmähgut: verbrennen, vergären, kompostieren, mulchen oder extensive Weide? Natur und Landschaft 79 (3). S. 110-117.
- Elsäßer M 2006 Nichtproduktionsfunktionen von Dauergrünland. In Möglichkeiten und Grenzen der Ökologisierung der Landwirtschaft. Mitteilungen aus der Biologischen Landesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem. S. 81-89.
- Fechner M, Schuppenies R, Baack I, Hertwig F, Kunkel G, Neubert G, Priebe R, Robowsky K-D und Zube P 2011 Grünland in Brandenburg. Standortgerecht - umweltverträglich - kostengünstig bewirtschaften. LVGF-Paulinenaue.
- FNR 2010 Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow-Prüzen.
- Fritsche U, Rausch L und Simon K-H 1989 Umweltwirkungsanalyse von Energiesystemen: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) - Endbericht - . Öko-Institut, Darmstadt/ Kassel.
- Fritsche U R, Dehoust G, Jenseits W, Hühnecke K, Rausch L, Schüler D, Wiegmann K, Heinz A, Hiebel M, Ising M, Kabasci S, Unger C, Thrän D, Fröhlich N, Scholwin F, Reinhardt G, Gärtner S, Patyk A, Baur F, Bemann U, Groß B, Heib M, Ziegler C, Flake M, Schmehl M und Simon S 2004 Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse. Öko-Institut & Partner, Darmstadt.

- Hartmann H, Böhm T und Maier L 2000 Naturbelassene biogene Festbrennstoffe - umweltrelevanten Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Bayerische Landesanstalt für Landtechnik.
- Heck P, Hoffmann D und Wern B 2004 Studie zur Weiterentwicklung der energetischen Verwertung von Biomasse in Rheinland-Pfalz. Institut für angewandtes Stoffstrommanagement (IfaS), Birkenfeld.
- Heilmann H und Harms J 2009 Untersuchungen zu optimalen Intensitäten der Grünlandbewirtschaftung und deren ökonomischen Auswirkungen auf den landwirtschaftlichen Betrieb. Ed. Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Institut für Betriebswirtschaft.
- Henrici V, Tonn B, Thumm U und Claupein W 2007 Erfassung der Auswaschung von verbrennungsrelevanten Inhaltsstoffen aus Grünlandaufwüchsen durch simulierten Regen. In Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau 8. Neue Funktionen des Grünlands: Ökosystem, Energie, Erholung. Eds. N Wrage und J Isselstein. S. 205-208.
- Hering T, Peisker D und Vetter A 2005 Energetische Verwertung von Getreide und Halmgutpellets. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena.
- Hering T, Scheffelowitz M und Peisker D 2008 Abschlussbericht des Teilprojektes „Bereitstellung und Analytik von Referenzbrennstoffen“ im Projekt „Feinstaubemissionen aus Kleinf Feuerungsanlagen für Getreide- und Stroh brennstoffe“ des IE gGmbH, Leipzig. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena.
- Hering T, Peisker D 2009 Abschlussbericht Untersuchungen zum Emissionsverhalten von Getreide und halmgutartigen Brennstoffen in Feuerungsanlagen in der Praxis. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena.
- Hertwig F und Pickert J 2005 Anforderungen an die landwirtschaftliche Grünlandnutzung in Brandenburg.
<http://lflf.brandenburg.de/sixcms/media.php/4055/Anforderungen%20an%20landwirtschaftliche%20Gr%C3%BCnlandnutzung.pdf>
- Hertwig F und Priebe R 2009 Futterqualität und Ertrag von extensiv bewirtschaftetem Grünland. Fleischrindertag, Götz.
- Hochberg H 2011 Zuordnung und Ertragsschätzung der Vegetationstypen in Saalfeld-Rudolstadt., persönliche Mitteilung
- Hochberg H und Zopf D 2011 Weidehaltung landwirtschaftlicher Tiere in Thüringen, Ergebnisse der Betriebsbefragung in 2006. persönliche Mitteilung
- Hochberg H, Zopf D, Maier U, Schwabe M und Hochberg E 2008 Ex-post Evaluation Entwicklungsplan für den ländlichen Raum Thüringen 2000-2006. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena.
- Hoffmann G, Schingnitz D, Schnapke A und Bilitewski B 2010 Reduction of CO₂-emission by using biomass in combustion and digestion plants. Waste Management 30 (5) S. 893-901.
- Jäkel K, Mau S, Wanka U, Albert E und Ott M 2003 Kapitel 3: Grundlagen der Biogasproduktion. In Biogaserzeugung und -verwertung. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- Jungbluth C H 2006 Kraft-Wärme-Kopplung mit Brennstoffzellen in Wohngebäuden im zukünftigen Energiesystem. Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energietechnik 59

- Käding H, Petrich G und Werner A 2005 Modell zur Errechnung von Ertrag und Futterqualität des Grünlandes in Nordostdeutschland anhand von Standort- und Bewirtschaftungsmerkmalen Handbuch für Modellanwender. Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung, Institut für Landnutzungssysteme und Landschaftsökologie, Müncheberg.
- Kaltschmitt M, Lenz V und Thrän D 2008 Zur energetischen Nutzung von Biomasse in Deutschland - Potenziale, Stand und Perspektiven. LIFIS ONLINE [25.04.08]
- Karl J, Ottmann M und Fischer T 2003 Agglomerations- und Korrosionsverhalten von Wirbelschichtfeuerungen beim Betrieb mit biogenen Brennstoffen.
- Kiesewalter S, Riehl G, Albert E und Röhricht C 2007 Nutzungsalternativen für Grünland. Eds. S Kiesewalter, G Riehl, E Albert und C Röhricht. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- Krapf G 2005 Projektbewertung und Qualitätssicherung durch QM Holzheizwerke"; Fachgespräch Biomasseheizwerke. Vortrag bei C.A.R.M.E.N e.V. Fachgespräch: „Bewertung und Finanzierung von Biomasseheizwerken“ 03.Juni 2005
- Landkreis Havelland Amt für Landwirtschaft, Veterenär und Lebensmittelüberwachung 2009 Unser Havelland - wir gestalten Zukunft Strategien und Handlungsempfehlungen zur Entwicklung des Landkreises Havelland bis 2020.
- Landkreis Havelland Amt für Landwirtschaft, Veterenär und Lebensmittelüberwachung 2010 Jahresbericht 2009.
- Launhardt T 2002 Umweltrelevante Einflüsse bei der thermischen Nutzung fester Biomasse in Kleinanlagen.
- Launhardt T, Hartmann H, Link H und Schmid V 2000 Verbrennungsversuche mit naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinfeuerungsanlage - Emissionen und Aschequalität. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU) Rosenkavalierplatz 2, 81925 München, München.
- LBV 2010 Basisinformationen Kreisprofil Havelland 2010 Fortschreibung "Brandenburg regional 2006". Landesamt für Bauen und Verkehr Dezernat Raumb Beobachtung, Hoppegarten.
- LELF 2010 Agrarbericht 2010 des Landes Brandenburg. Eds. Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg und LELF Landesamt für Ländliche Entwicklung. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (MLUV) Ref. Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, Potsdam.
- LLH-Hessen 2011 Raum-/Schüttgewichte landwirtschaftlicher Erzeugnisse. Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen, Kassel.
- LWK Weser Ems 2005 Biomasse Potenzialstudie Ostfriesland.
- Martin J 2008 Hohe Grundfutterqualität für die Qualitätsrindfleischerzeugung unerlässlich! Vortrag 9. Raminer Futterbautag. S. 12-17.
- Maurer J und Wagner F 2003 Studie zur Grasschnittverwertung.
- Muchow T, Schulte K und Frankenberg A 1997 „Umsetzung der Biotop- und Landschaftspflege durch Integration in landwirtschaftliche Nutzung und Vermarktung regionaler Produkte".
- N.N. 2006 Gemeinsamer Erlass des MIR und des MLUV zur bauplanungsrechtlichen Zulässigkeit von Biomasseanlagen nach § 35 Abs. 1 Nr. 6 des Baugesetzbuches (Biomasseerlass) vom 5. April 2006.

- Nitsch H, Osterburg B, Laggner B und Roggendorf W 2010 Wer schützt das Grünland? - Analysen zur Dynamik des Dauergrünlandes und entsprechender Schutzmechanismen. In Vorträge anlässlich der 50. Jahrestagung der GEWISOLA "Möglichkeiten und Grenzen wissenschaftlicher Politikanalyse".
- Obernberger I 1997 Stand und Entwicklung der Verbrennungstechnik. VDI Bericht 1319, 47-80.
- Oechsner H 2005 Möglichkeiten zur energetischen Verwertung von Landschaftspflegeheu. Natur und Landschaft 80. S. 426-429.
- Oechsner H und Maurer K 2004 Verbrennung von Heu und Getreide - für jeden technisch machbar? In Tagungsband Nachwachsende Rohstoffe für Baden-Württemberg - Forschungsprojekte für den Ländlichen Raum.
- Ostermeyer A und Pirscher F 2011 Potenzial von Bioenergie in Deutschland - Studien im Vergleich. Berichte über Landwirtschaft 88 (2). S. 247-274.
- Ottmann M 2007 Verbrennung biogener Brennstoffe in stationären Wirbelschichtfeuerungen.
- Peisker D 2007 Stand der Technik der Strohverbrennung Brennstoffparameter, rechtliche Rahmenbedingungen, Technik und Wirtschaftlichkeit. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena.
- Peisker D, Hering T und Vetter A 2007 Energetische Verwertung von Stroh – Möglichkeiten und Grenzen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena.
- Plöchl M 2011. persönliche Mitteilung
- Priebe R 2011. persönliche Mitteilung
- Prochnow A, Heiermann M, Plöchl M, Amon T und Hobbs P J 2009a Bioenergy from permanent grassland - A review: 2. Combustion. Bioresource Technology 100 , 4945-4954.
- Prochnow A, Heiermann M, Plöchl M, Linke B, Idler C, Amon T und Hobbs P J 2009b Bioenergy from permanent grassland - A review: 1. Biogas. Bioresource Technology 100 (21) S. 4931-4944.
- Reinhold G 2011 Biogasanlagen in Saalfeld-Rudolstadt. persönliche Mitteilung
- Rode M, Schneider C, Ketelhake G und Reißhauer D 2005 Naturschutzverträgliche Erzeugung und Nutzung von Biomasse zur Wärme- und Stromgewinnung. Bundesamt für Naturschutz, Bonn.
- Roffeis M 2011 Futterrationen und Haltungsformen landwirtschaftlicher Tiere in ausgewählten Landkreisen Brandenburgs. persönliche Mitteilung
- Rösch C 2007 Die Nutzung von überschüssigem Grünland als Energieressource Potenziale und Wirtschaftlichkeit am Beispiel Baden-Württemberg. Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis 3 (16). S. 88-93.
- Rösch C, Raab K, Skarka J und Stelzer V 2007 Energie aus dem Grünland - eine nachhaltige Entwicklung? Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft. FZKA 7333
- Rösch C, Raab K und Stelzer V 2006 Potenziale der Biogasgewinnung aus Gras von Überschussgrünland in Baden-Württemberg. In Bioenergienutzung in Baden-Württemberg - Auf dem Weg zum nachhaltigen Ausbau Tagung vom 13. Februar 2006, Stuttgart, Haus der Wirtschaft.
- Spiekers H 2004 Tierphysiologische Anforderungen an die Silagequalität. LfL, Institut für Tiernährung und Futterwirtschaft Grub. www.lfl.bayern.de/ite/futterwirtschaft/07330/linkurl_0_1.pdf

- Statistisches Bundesamt Deutschland 2011 Bauen und Wohnen - Bestand an Wohnungen - Fachserie 5 Reihe 3. Statistisches Bundesamt Deutschland, Wiesbaden.
- Statistisches Landesamt Brandenburg 2010 Statistischer Bericht A I 2 - hj 2 / 09 - Bevölkerung der Gemeinden im Land Brandenburg 31.12.2009. Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, Potsdam.
- Statistisches Landesamt Thüringen 2010 Statistisches Jahrbuch Thüringen 2010. Thüringer Landesamt für Statistik, Erfurt.
- TMLNU 2007 Förderung landwirtschaftlicher Betriebe in benachteiligten Gebieten. Thüringer Ministeriums für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt, Erfurt.
- TLUG 2011 Umwelt regional, Landkreis Saalfeld-Rudolstadt. Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie www.tlug-jena.de/uw_raum/umweltregional/slf/index.html
- Tonn B 2010 Thermische Nutzung von artenreichem Grünland: Prognose und Optimierung der Brennstoffqualität. In „Koexistenz Grüne Gentechnik“. S. 43-46. Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften.
- Tonn B, Thumm U und Claupein W 2007 Chemische Brennstoffqualität als Grundlage der Verbrennung von Aufwüchsen extensiv genutzter Grünlandbestände. In Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau 8. Neue Funktionen des Grünlands: Ökosystem, Energie, Erholung. Eds. N Wrage und J Isselstein. S. 169-172.
- Tonn B, Thumm U und Claupein W 2008a Späte Schnitzeitpunkte von Extensivgrünland - eine Strategie zur Erzeugung qualitativ hochwertiger Biofestbrennstoffe aus der Landschaftspflege? In Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau 8. Neue Funktionen des Grünlands: Ökosystem, Energie, Erholung. Eds. N Wrage und J Isselstein. S. 293-296.
- Tonn B, Thumm U und Claupein W 2008b Verbrennungseigenschaften von Landschaftspflegeheu. Naturschutz und Landschaftsplanung 40. S. 367-372.
- Tonn B, Thumm U und Claupein W 2010 Semi-natural grassland biomass for combustion: influence of botanical composition, harvest date und site condition on fuel composition. Grass and Forage Science 65. S. 383-397.
- Vetter A 2003 Qualitätsanforderungen an halmgutartige Bioenergieträger hinsichtlich der energetischen Verwertung. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena.
- Werner A 2001 Einfluss des Mulchens von Grünlandflächen auf den Nährstoffkreislauf. Archives of Agronomy and Soil Science 47. S. 225-238.
- Wichmann S und Wichtmann W 2009 Energiebiomasse aus Niedermooren (ENIM). Wichmann,S.;Wichtmann,W..
- Wiegmann K, Heintzmann A, Peters W, Scheuermann A, Seidenberger T und Thoss C 2007 Bioenergie und Naturschutz: Sind Synergien durch die Energienutzung von Landschaftspflegeresten möglich? www.oeko.de.
- Zimmer J 2011 Haltungsformen und Aufstallung landwirtschaftlicher Tiere in ausgewählten Landkreisen Brandenburgs. LELV Brandenburg, schriftliche Mitteilung

9 Anhang

A 1: Zusammensetzung des Pflanzenbestandes (EA%) bei unterschiedlichem Nutzungssystem - Standort Oberweißbach (Waldstorchschnabel-Goldhaferwiese)

		Ertragsanteil (%)											
		Nutzungssystem (Variante)											
		1			2			3			4		
		2008	2009	2010	2008	2009	2010	2008	2009	2010	2008	2009	2010
Gräser													
Fuchsschwanz Wiesen-	<i>Alopecurus pratensis</i>				r	r	r	r					
Hafer Flaumiger Wiesen-	<i>Avenula pubescens</i>				r	r	r				r	r	+
Hafer Glatt-	<i>Arrhenatherum elatius</i>				r	r	r						
Hafer Gold-	<i>Trisetum flavescens</i>	26	28	24	31	30	26	33	27	21	32	37	25
Honiggras Weiches	<i>Holcus mollis</i>	+			r	r	r					r	
Honiggras Wolliges	<i>Holcus lanatus</i>	17	6	12	16	3	10	25	2	5	24	+	2
Knaulgras Gemeines	<i>Dactylis glomerata</i>	13	14	11	4	3	3	2	+	1	1	+	1
Lieschgras Wiesen-	<i>Phleum pratense</i>	5	7	5	1	2	2	+	+	+	1	+	+
Rispe Gemeine	<i>Poa trivialis</i>	3	2	4	3	2	3	+	+	+	+	+	2
Rispe Wiesen-	<i>Poa pratensis</i>	8	8	7	10	10	9	5	10	8	5	7	7
Ruchgras Gemeines	<i>Anthoxanthum odoratum</i>	+	+	+	1	1	1	4	6	5	3	3	5
Schwingel Rot-	<i>Festuca rubra</i>				+	+		3	2	6	1	4	6
Schwingel Wiesen-	<i>Festuca pratensis</i>	3	5	5	5	6	5	2	4	2	3	3	3
Straußgras Rot-	<i>Agrostis capillaris</i>	1	+	+	1	3	3	5	8	8	6	10	8
Weidelgras Deutsches	<i>Lolium perenne</i>	1	+	1	2	2	3	3	3	3	3	2	3
Gräser ges.		77	70	69	74	62	65	82	62	59	79	66	62
Kräuter													
Bärenklau Wiesen-	<i>Heracleum sphondylium</i>	3	3	4	3	3	4	3	2	2	3	1	1
Bärwurz	<i>Meum athamanticum</i>	r	r								r	r	r
Ehrenpreis Feld-	<i>Veronica arvensis</i>	r	r	r				r	r	r		r	
Ehrenpreis Gamander-	<i>Veronica chamaedrys</i>	1	1	2	+	+	+	1	1	2	1	2	8
Ferkelkraut Gemeines	<i>Hypochaeris radicata</i>							r	r	r			
Flockenblume Perücken-	<i>Centaurea pseudophrygia</i>							+	+	+			
Frauenmantel Gemeiner	<i>Alchemilla vulgaris</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Gänseblümchen Ausdauer.	<i>Bellis perennis</i>				r				r	r	r		
Giersch	<i>Aegopodium podagraria</i>							r			r		r
Glockenblume Rundblättr.	<i>Campanula rotundifolia</i>	r	r	r	r	r		r	r	r	r	r	r
Glockenblume Wiesen-	<i>Campanula patula</i>								r	r			
Günsel Kriechender	<i>Ajuga reptans</i>									r			
Hahnenfuß Kriechender	<i>Ranunculus repens</i>												
Hahnenfuß Scharfer	<i>Ranunculus acris</i>	1	1	1	1	+	+	1	+	1	1	1	3
Hartheu Kanten-	<i>Hypericum maculatum</i>	r	+	+	r	r	r	+	1	2	1	2	1
Hornkraut Gemeines	<i>Cerastium holosteoides</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Kerbel Wiesen-	<i>Anthriscus sylvestris</i>	4	1	2	5	3	3	1	1	1	2	+	+
Kleiner Sauerampfer	<i>Rumex acetosella</i>									r			
Kratzdistel Gemeine	<i>Cirsium vulgare</i>			r	r	r							+
Löwenzahn Gemeiner	<i>Taraxacum officinale</i>	2	2	3	2	1	1	2	5	5	2	4	3
Margerite Wiesen-	<i>Leucanthemum vulgare</i>	+	1	1	+	1	1	r	+	+	r	r	
Pippau Weicher	<i>Crepis mollis</i>							r	+	1			
Pippau Wiesen-	<i>Crepis biennis</i>			r									
Sauerampfer Wiesen-	<i>Rumex acetosa</i>	8	10	9	4	5	5	6	7	6	6	8	6
Schafgarbe Gemeine	<i>Achillea millefolium</i>	1	1	1	1	1	1	+	1	1	+	+	+
Schaumkraut Wiesen-	<i>Cardamine pratensis</i>				r			r					
Steinbrech Körnchen-	<i>Saxifraga granulata</i>	r	r	r	+	r	1	+	+	1	+	r	+
Sternmiere Gras-	<i>Stellaria graminea</i>					r	r	r	r				
Stiefmütterchen Wildes	<i>Viola tricolor</i>					r							
Storchschnabel Wald-	<i>Geranium sylvaticum</i>	+	+	+	1	1	1	+	1	1	+	+	+
Stumpfbältriger Ampfer	<i>Rumex obtusifolius</i>							r	r				
Teufelskralle Ährige	<i>Phyteuma spicatum</i>						r		+		r	r	
Wegerich Spitz-	<i>Plantago lanceolata</i>	+	+	+	+	r	+	3	10	10	3	7	14
Weidenröschen Vierkant.	<i>Epilobium adnatum</i>			r			r						
Kräuter ges.		20	20	23	17	15	17	17	29	33	19	25	36
Leguminosen													
Hornklee Gemeiner	<i>Lotus corniculatus</i>					r	r						
Klee Weiß-	<i>Trifolium repens</i>	r	r	r	1	2	1	r	r			r	
Rotklee Wiesen-	<i>Trifolium pratense</i>	3	9	6	8	21	16	1	9	8	2	9	2
Wicke Vogel-	<i>Vicia cracca</i>	r	+	1	r	+	1	r	+	r	r	r	+
Wicke Zaun-	<i>Vicia sepium</i>	+	1	1	+	+	+	r		r	r	r	r
Leguminosen ges.		3	10	8	9	23	18	1	9	8	2	9	2

A 2: Zusammensetzung des Pflanzenbestandes (EA%) bei unterschiedlichem Nutzungssystemen - Standort Elsfleth (Schnabelseggenried)

		Ertragsanteil (%)											
		Nutzungssystem (Variante)											
		1			2			3			4		
		2008	2009	2010	2008	2009	2010	2008	2009	2010	2008	2009	2010
Gräser													
Binse Spitzblütige	<i>Juncus acutiflorus</i>									r			
Reitgras Sumpf-	<i>Calamagrostis canescens</i>		1	1		2	1		+	r		+	+
Rispe Sumpf-	<i>Poa palustris</i>		+	+		+	+		+	+		+	+
Rohrglanzgras	<i>Phalaris arundinacea</i>	20	15	9	19	21	14	19	23	23	19	21	23
Schwaden Wasser-	<i>Glyceria maxima</i>	1	r	+		+	1	r	+	1	r	+	1
Segge Blasen-	<i>Carex vesicaria</i>								1	1		+	1
Segge Blasen-	<i>Carex rostrata</i>	76	76	85	76	74	80	77	73	69	77	73	69
Simse Wald-	<i>Scirpus sylvaticus</i>		1	1	r	r	+	r	1	1	+	1	1
Straußgras Weißes	<i>Agrostis gigantea</i>	2	4	+	3	1	1	2	r	1	2	+	+
Gräser ges.		99	97	96	98	98	97	98	98	96	98	95	95
Kräuter													
Ampfer Stumpfbblätteriger	<i>Rumex obtusifolius</i>			r			r						
Blutweiderich Gemeiner	<i>Lythrum salicaria</i>	r	r	+	r	r	r	r	r	r	r	r	r
Fingerkraut Gänse-	<i>Potentilla anserina</i>											r	r
Fingerkraut Kriechendes	<i>Potentilla reptans</i>												r
Gilbweiderich Pfennig-	<i>Lysimachia nummularia</i>		r	+	r	r	+	r	+	+		+	+
Hahnenfuß Kriechender	<i>Ranunculus repens</i>												
Hahnenfuß Scharfer	<i>Ranunculus acris</i>	r	r	r		r	r	r	r	r	r		
Labkraut Sumpf-	<i>Galium palustre</i>	r	+	1	r	r	+	r	r	+		+	+
Minze Polei-	<i>Mentha pulegium</i>	+	2	3	+	2	3	+	2	4	+	5	5
Schwertlilie Wasser-	<i>Iris pseudacorus</i>	1	1	r	2	r		2	+	r	2	+	
Sumpfkresse Gemeine	<i>Rorippa palustris</i>			r		r	r	r	r	r		r	r
Vergißmeinnicht Sumpf-	<i>Myosotis palustris</i>		r	r		r	r	r	r	r		r	r
Kräuter ges.		1	3	4	2	2	3	2	2	4	2	5	5

A 3: Zusammensetzung des Pflanzenbestandes (EA%) bei unterschiedlichem Nutzungssystem - Standort Oelsnitz (Waldengelwurz-Kohldistel-Feuchtwiese)

		Ertragsanteil (%)											
		Nutzungssystem (Variante)											
		1			2			3			4		
		2008	2009	2010	2008	2009	2010	2008	2009	2010	2008	2009	2010
Gräser													
Binse Flatter-	<i>Juncus effusus</i>	4	8	9	11	8	10	12	8	12	14	12	16
Binse Glanz-	<i>Juncus articulatus</i>	r	r	2	r	+	1	r	+	1	r	r	+
Fuchsschwanz Wiesen-	<i>Alopecurus pratensis</i>	6	7	9	4	10	9	11	15	17	4	8	10
Hafer Glatt-	<i>Arrhenatherum elatius</i>				1	1	1				r		
Honiggras Wolliges	<i>Holcus lanatus</i>	30	34	24	12	16	12	22	25	16	22	24	10
Knautgras Gemeines	<i>Dactylis glomerata</i>							r	+	1			
Lieschgras Wiesen-	<i>Phleum pratense</i>	r	1	1	r	r	+	r	1	1	2	1	2
Rohrglanzgras	<i>Phalaris arundinacea</i>	1	1	1	1	r	1	1	r	1	+	r	+
Ruchgras Gemeines	<i>Anthoxanthum odoratum</i>	1			r	+	1	r	1	1	+	1	+
Schmieie Rasen-	<i>Deschampsia cespitosa</i>							r	r	1		r	+
Schwingel Rot-	<i>Festuca rubra</i>	1	1	4	2	4	7	2	5	6	+	5	4
Schwingel Wiesen-	<i>Festuca pratensis</i>	r	1	2	1	7	7	1	6	4	+	4	3
Segge Hasenpfoten-	<i>Carex leporina</i>	r	r	2	+	1	2		r	+	+	+	1
Segge Hirse-	<i>Carex panicea</i>					r	+				r	r	+
Segge Schnabel-	<i>Carex rostrata</i>	4	3	2	2	2	3	+	+	+	8	5	6
Straußgras Flecht-	<i>Agrostis stolonifera</i>	+	r	2							r	r	r
Straußgras Rot-	<i>Agrostis capillaris</i>				2	2	3	1	2	4	+	2	4
Gräser ges.		47	56	58	36	51	57	50	63	65	50	62	56
Kräuter													
Ampfer Stumpfblättriger	<i>Rumex obtusifolius</i>									r		r	r
Engelwurz Wald-	<i>Angelica sylvestris</i>	r	r	r	r	r	r	2	1	+	1	+	2
Frauenmantel Gemeiner	<i>Alchemilla vulgaris</i>			r									
Günsel Kriech-	<i>Ajuga reptans</i>						r						
Hahnenfuß Kriechender	<i>Ranunculus repens</i>	r	r	r	r	r	+		r	r			r
Hartheu Tüpfel-	<i>Hypericum perforatum</i>			r		r	r						
Knöterich Wiesen-	<i>Polygonum bistorta</i>												r
Kratzdistel Kohl-	<i>Cirsium oleraceum</i>	2	2	5	3	2	1	4	3	3	2	2	3
Kratzdistel Sumpf-	<i>Cirsium palustre</i>	r	1	1			r	r	+	1			
Labkraut Kletten-	<i>Galium aparine</i>		r	1	r	+	1	r	+	1	+	+	+
Labkraut Wiesen-	<i>Galium mollugo</i>		r	r				r					
Löwenzahn Gemeiner	<i>Taraxacum officinale</i>			r									
Mädesüß Echtes	<i>Filipendula ulmaria</i>	51	41	27	58	40	30	39	26	19	41	28	25
Pippau Wiesen-	<i>Crepis biennis</i>			r		r	+	r	r	r			
Schachtelhalm Sumpf-	<i>Equisetum palustre</i>	r	r	+	1	1	2	1	1	1	1	1	5
Sternmiere Gras-	<i>Stellaria graminea</i>	r	r	r	r	r	r	r	r	r		+	+
Storachschnabel Wiesen-	<i>Geranium pratense</i>								r				
Sumpfdotterblume	<i>Caltha palustris</i>	r	r	1	+	+	+	r	r	+		r	r
Vergißmeinnicht Sumpf-	<i>Myosotis palustris</i>				r	r	r						
Weidenröschen Rauhaar.	<i>Epilobium hirsutum</i>	r	r	r	+	+	1	+	r	r	+	+	1
Kräuter ges.		53	44	35	62	43	35	46	31	25	45	31	36
Leguminosen													
Hornklee Sumpf-	<i>Lotus uliginosus</i>	+	+	3	1	4	4	2	4	4			
Rotklee Wiesen-	<i>Trifolium pratense</i>		r	+							2	4	4
Platterbse Wiesen-	<i>Lathyrus pratensis</i>	+	+	4	1	2	4	2	2	6	3	3	4
Leguminosen ges.				7	2	6	8	4	6	10	5	7	8

A 4: Zusammensetzung des Pflanzenbestandes (EA%) bei unterschiedlichem Nutzungssystem - Standort Ebereschenhof (Rohrglanzgrasröhricht)

		Ertragsanteil (%)											
		Nutzungssystem (Variante)											
		1			2			3			4		
		2008	2009	2010	2008	2009	2010	2008	2009	2010	2008	2009	2010
Gräser													
Binse Glieder-	<i>Juncus articulatus</i>			r						r			
Fuchsschwanz Knick-	<i>Alopecurus geniculatus</i>	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2	1	+
Fuchsschwanz Wiesen-	<i>Alopecurus pratensis</i>	3	3	3	+	+	+	5	4	6	5	3	3
Quecke Gemeine	<i>Elytrigia repens</i>	1	1	1	+	+	1						
Rispe Gemeine	<i>Poa trivialis</i>	11	11	9	15	15	8	16	16	14	12	12	11
Rispe Wiesen-	<i>Poa pratensis</i>	4	4	8	1	3	6				+	r	+
Rohrglanzgras	<i>Phalaris arundinacea</i>	78	79	77	79	79	82	77	79	78	81	84	86
Segge Falsche Fuchs-	<i>Carex cuprina</i>	r	r	r	1	+	+	+	+	+	+	+	r
Segge Igel-	<i>Carex echinata</i>							+	r	r			
Straußgras Weißes	<i>Agrostis gigantea</i>	r	r	r	r	+	2						
Gräser ges.		98	99	99	98	99	100	99	100	100	100	100	100
Kräuter													
Ampfer Stumpfbblätteriger	<i>Rumex obtusifolius</i>	r	r	r			r						
Fingerkraut Gänse-	<i>Potentilla anserina</i>						r						
Hahnenfuß Kriechender	<i>Ranunculus repens</i>	+	+	+									
Hahnenfuß Scharfer	<i>Ranunculus acris</i>	2	1	1	2	1	+	1	+	+	+	+	+
Hornkraut Gemeines	<i>Cerastium holosteoides</i>	r	r	r		r					r	r	
Knöterich Wiesen-	<i>Polygonum bistorta</i>				r	r	r	r	r	r	r	r	r
Kratzdistel Acker-	<i>Cirsium arvense</i>	r	r	r			r			r			
Lichtnelke Kuckucks-	<i>Lychnis flos-cuculi</i>					r	r		r	r		r	
Löwenzahn Gemeiner	<i>Taraxacum officinale</i>	r	r	r	r	r	r				r		
Minze Roß-	<i>Mentha longifolia</i>											r	
Weidenröschen Sumpf-	<i>Epilobium palustre</i>						r		r	r			
Kräuter ges.		2	1	1	2	1		1					
Leguminosen													
Klee Weiß-	<i>Trifolium repens</i>				r	r	r						
Platterbse Wiesen-	<i>Lathyrus pratensis</i>	r			r	r	r						
Wicke Vogel-	<i>Vicia cracca</i>	r			r	r	r						
Leguminosen ges.													

A 5: Zusammensetzung des Pflanzenbestandes (EA%) bei unterschiedlichem Nutzungssystem - Standort Immenstadt (Pfeifengras-Streuwiese)

		Ertragsanteil (%)											
		Nutzungssystem (Variante)											
		1			2			3			4		
		2008	2009	2010	2008	2009	2010	2008	2009	2010	2008	2009	2010
Gräser													
Binse Blaugrüne	<i>Juncus inflexus</i>	+	+	1	4	1	2	3	1	1	2	1	+
Binse Flatter-	<i>Juncus effusus</i>	6	6	8	4	2	5	3	3	4	3	2	4
Binse Glieder-	<i>Juncus articulatus</i>	r	r	r	+	+	1	+	+	+	1	1	1
Honiggras Wolliges	<i>Holcus lanatus</i>	9	8	6	7	5	5	9	6	5	10	8	8
Kammgras Weide-	<i>Cynosurus cristatus</i>	+	r	r	r			r					
Lieschgras Wiesen-	<i>Phleum pratense</i>	+	+	r				r	+	+	r	+	r
Pfeifengras Blaues	<i>Molinia caerulea</i>	3	3	3	3	6	5	2	5	6	4	4	5
Ruchgras Gemeines	<i>Anthoxanthum odoratum</i>	3	5	6	3	4	6	3	3	4	3	4	5
Schwingel Rot-	<i>Festuca rubra</i>	+	+	+	+	1	+	+	1	2	1	1	2
Segge Große Gelb-	<i>Carex flava</i>	3	5	5	5	8	5	4	6	5	2	6	5
Segge Igel-	<i>Carex echinata</i>	6	4	3	5	4	4	5	4	3	6	4	2
Segge Sumpf-	<i>Carex acutiformis</i>	12	12	12	15	11	11	15	9	14	12	9	11
Straußgras Flecht-	<i>Agrostis stolonifera</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	1	+	+	+
Straußgras Rot-	<i>Agrostis capillaris</i>	4	3	3	5	4	4	5	3	5	5	3	3
Zittergras	<i>Briza media</i>	5	3	4	4	1	3	4	3	2	4	2	2
ges. Gräser		51	49	51	55	47	51	53	44	52	53	45	48
Kräuter													
Abbiß Teufels-	<i>Succisa pratensis</i>	3	2	2	3	1	3	3	2	2	3	1	2
Blutweiderich Gemeiner	<i>Lythrum salicaria</i>	r	r	r									r
Blutwurz	<i>Potentilla erecta</i>	3	2	4	4	3	4	4	4	3	4	2	3
Engelwurz Wald-	<i>Angelica sylvestris</i>	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	3
Fiebertee	<i>Menyanthes trifoliata</i>	1	1	1	1	1	1	+	1	1	+	1	1
Fingerkraut Sumpf-	<i>Potentilla palustris</i>	2	1	1	1	1	1	+	r	+	+	+	1
Flockenblume Wiesen-	<i>Centaurea jacea</i>		r	r									
Hahnenfuß Scharfer	<i>Ranunculus acris</i>	r	+	r	r	r	r	r	+	1	r	r	r
Herzblatt Sumpf-	<i>Parnassia palustris</i>	r	r	r					r	r			
Hungerblümchen Frühl.-	<i>Erophila verna</i>	r	+	r			r					r	
Klappertopf Kleiner	<i>Rhinanthus minor</i>	5	3	2	3	2	1	4	3	2	4	3	1
Knabenkraut Fleischrotes	<i>Dactylorhiza incarnata</i>	1	1	2	1	3	4	1	2	2	1	1	1
Knöterich Wiesen-	<i>Polygonum bistorta</i>	r	r	r	+	1	1	+	1	1	+	1	2
Kratzdistel Sumpf-	<i>Cirsium palustre</i>	+	r	r		r	r			r			r
Kreuzblümchen Gemeines	<i>Polygala vulgaris</i>	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r
Labkraut Sumpf-	<i>Galium palustre</i>	r	r	r	r	r	+	r	r	r	r	r	r
Lichtnelke Kuckucks-	<i>Lychnis flos-cuculi</i>		r	r				r	r	r	r	r	r
Löwenzahn Rauher	<i>Leontodon hispidus</i>	3	3	1	2	3	1	2	3	2	2	2	2
Mädesüß Echtes	<i>Filipendula ulmaria</i>	6	3	4	6	3	4	5	4	3	6	7	12
Margerite Wiesen-	<i>Leucanthemum vulgare</i>							r	r	r	r	r	
Minze Wasser-	<i>Mentha aquatica</i>	+	+	1	r	+	2	r	r	+	r	+	+
Schachtelhalm Sumpf-	<i>Equisetum palustre</i>	10	16	10	10	16	10	10	19	10	12	17	11
Sternmiere Quell-	<i>Stellaria uliginosa</i>	+	+	1	+	+	r				1	+	r
Sumpfdotterblume	<i>Caltha palustris</i>	+	+	+	r	1	+	r	r	r	r	r	r
Veilchen Sumpf-	<i>Viola palustris</i>	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	+	r
Vergißmeinnicht Sumpf-	<i>Myosotis palustris</i>	r	r	r	r	r	r		r	r		r	r
Wegerich Spitz-	<i>Plantago lanceolata</i>	+	r	1	+	r	r						+
Wiesenknopf Großer	<i>Sanguisorba officinalis</i>	10	14	11	8	12	10	12	10	13	9	13	8
ges. Kräuter		45	47	43	40	48	43	42	50	41	43	49	47
Leguminosen													
Hornklee Sumpf-	<i>Lotus uliginosus</i>	3	2	5	3	2	5	4	2	4	3	2	4
Klee Schweden-	<i>Trifolium hybridum</i>	1	+	+	1	+	+	1	1	1	1	1	+
Platterbse Sumpf-	<i>Lathyrus palustris</i>	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r
Rotklee Wiesen-	<i>Trifolium pratense</i>	+	2	1	1	3	1	+	3	2	+	3	1
Wicke Vogel-	<i>Vicia cracca</i>	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r
ges. Leguminosen		4	4	6	5	5	6	5	6	7	4	6	5